Цена 12 коп.

Ю. В. Зайцев



ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РЕЗИСТОРЫ



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Справочная серия

Выпуск 702

Ю. В. ЗАЙЦЕВ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РЕЗИСТОРЫ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1969

6Ф2.13
З 12

УДК 621.378.002

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А. И., Борисов В. Г., Бурдейный Ф. И., Бурлянд В. А., Ванеев В. И., Геништа Е. Н., Жеребцов И. П., Канаева А. М., Корольков В. Г., Кренкель Э. Т., Куликовский А. А., Смирнов А. Д., Тарасов Ф. И., Шамшур В. И.

Ю. В. Зайцев

З 12 Полупроводниковые резисторы, М., «Энергия», 1969.

48 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека, Справочная серия, вып. 702)

Описаны конструкции и параметры нелинейных полупроводниковых резисторов (терморезисторов, варисторов, фоторезисторов) и рассмотрены их технические и эксплуатационные характеристики. Приведены особенности эксплуатации и номенклатура полупроводниковых резисторов отечественного производства.

Брошюра предназначена для радиолюбителей, но может быть использована специалистами, работающими в области конструирования радиоаппаратуры.

3-4-5
383-68

6Ф2.13

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ

Полупроводниковые резисторы — широкий класс приборов, принцип действия которых основан на свойствах полупроводниковых материалов изменять свое сопротивление под действием температуры, электромагнитного излучения, приложенного напряжения и т. п.

К наиболее распространенным полупроводниковым резисторам относятся терморезисторы, фоторезисторы и варисторы, которые нашли широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре, автоматике и электротехнике.

Использование полупроводниковых резисторов позволяет сравнительно просто решить многие проблемы температурной стабилизации в радиосхемах, создания различных функциональных блоков, систем управления и т. п.

Терморезисторы (рис. 1,*а*) — резисторы, сопротивление которых значительно изменяется при изменении температуры. Широкое распространение получили терморезисторы, сопротивление которых резко уменьшается при увеличении температуры, — терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) (рис. 2,*а*).

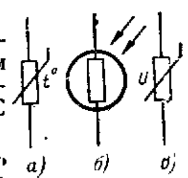


Рис. 1. Обозначения полупроводниковых резисторов в радиосхемах.

а — терморезистор; *б* — фоторезистор; *в* — варистор.

В последние годы разработаны высокочувствительные терморезисторы с положительным ТКС. Специфической особенностью таких терморезисторов является исключительно высокий ТКС в определенном интервале температур.

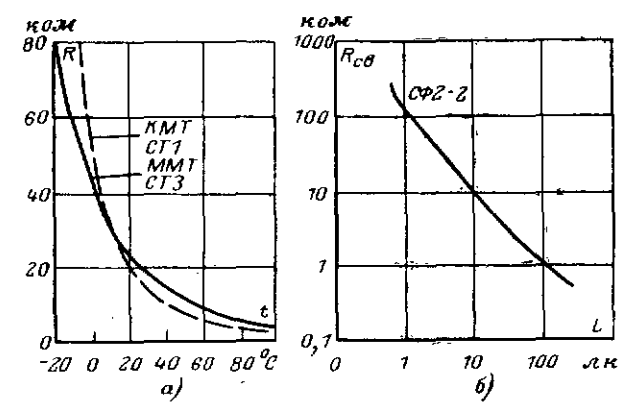
Кроме полупроводниковых терморезисторов, промышленность выпускает проволочные терморезисторы, материалом для изготовления которых служит проволока диаметром 0,04—0,09 *мм* из меди, платины и других материалов. Проволочные терморезисторы имеют высокую стабильность характеристик, взаимозаменяемы, но их ТКС невелик (не более 0,4—0,5%/° С).

Температурный коэффициент сопротивления полупроводниковых терморезисторов в 15—20 раз больше, чем проволочных, что позволяет использовать простые вторичные приборы и получать высокую точность измерений.

Немаловажное достоинство полупроводниковых резисторов заключается в том, что их можно изготовить с большими номинальными сопротивлениями и размерами в десятые доли миллиметра. Уменьшение размеров позволяет снизить инерционность, т. е. промежуток

времени, необходимый для того, чтобы терморезистор принял температуру окружающей среды.

Главный недостаток полупроводниковых терморезисторов в том, что их температурная характеристика нелинейна и они не взаимозаменяемы.



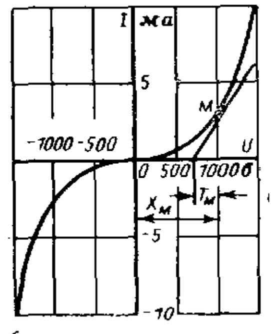


Рис. 2. Характерные зависимости полупроводниковых резисторов.

а — для терморезисторов; *б* — для фоторезисторов; *в* — вольт-амперная характеристика варистора.

Фоторезисторы — полупроводниковые резисторы, принцип действия которых основан на фоторезистивном эффекте — изменении сопротивления полупроводникового материала под действием электромагнитного излучения, причем это сопротивление может уменьшаться на несколько порядков из-за увеличения числа носителей тока — электронов в полупроводниковом материале (рис. 2,*б*). С увеличением силы света растет число поглощающих энергию электронов, и этой энергии в ряде случаев бывает достаточно, чтобы перевести электроны в свободное состояние и соответственно повысить электропроводность материала.

Варисторы — приборы, принцип действия которых основан на эффекте, который заключается в том, что с увеличением приложенного напряжения сопротивление полупроводникового материала уменьшается. На основе ряда полупроводниковых материалов изготовлены резисторы, у которых увеличение напряжения в 2—3 раза сопровождается уменьшением сопротивления в десятки раз. О характере зависимости сопротивления материала от приложенного напряжения можно судить по вольт-амперной характеристике варистора (рис. 2,*в*).

Явление изменения сопротивления материала под действием приложенного напряжения известно давно. Такое явление наблюдается

у ряда окислов и сульфидов металлов, карбида кремния, диборида титана, а также у многих материалов сложного состава.

Многочисленные исследования показали, что наиболее перспективным материалом для создания варисторов является карбид кремния. На основе этого материала и выполняются в настоящее время полупроводниковые варисторы.

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУКЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

Материал для создания терморезисторов должен удовлетворять ряду особых требований. К числу их относятся: чисто электронная электропроводность материала и возможность регулирования ее, стабильность характеристик материала в диапазоне рабочих температур, простота технологии изготовления изделий. Материалы, используемые для получения терморезистивных элементов, должны быть нечувствительными к загрязнениям, которые могут произойти в процессе технологического изготовления изделий.

Наибольший интерес для создания терморезистивных элементов представляют полупроводниковые материалы, обладающие большим ТКС. Хотя материалы с большим отрицательным температурным коэффициентом были известны еще в прошлом столетии, потребовались большие исследования, чтобы синтезировать материалы, обладающие комплексом необходимых свойств.

Полупроводниковые терморезисторы с отрицательным ТКС выполняются в основном из синтетических материалов, состоящих из смеси окислов переходных металлов, обладающих способностью изменять в соединениях свою валентность. Соединения переходных металлов с кислородом имеют обычно ярко выраженные полупроводниковые свойства.

Среди материалов, используемых для терморезисторов, наиболее широкое распространение получили окислы CuO, Mn_3O_4, Co_3O_4, NiO, а также смеси их, что позволило получить терморезисторы с малыми допускаемыми отклонениями по сопротивлению и ТКС.

На основе смесей окислов меди и марганца получены полупроводниковые материалы с электропроводностью в пределах от 10^{-8} до 10^{-1} $(ом \cdot см)^{-1}$. Электропроводность кобальто-марганцевых окисных полупроводников лежит в пределах от 10^{-9} до 10^{-3} $(ом \cdot см)^{-1}$.

Получение необходимых электропроводности и ТКС достигается выбором процентного соотношения окислов металлов в композиции при использовании метода совместного осаждения щелочью азотнокислых соединений марганца, кобальта и меди и последующего прокаливания гидратов окислов. Для получения термочувствительных элементов исходный материал в виде порошка с органической связкой обрабатывают выдавливанием через мундштук или прессованием по технологии, используемой в керамическом производстве.

Важной технологической операцией в производстве терморезисторов является создание омических контактов к термочувствительным элементам. Для этого на торцевых поверхностях термочувствительных элементов, выполняемых в виде стержней, дисков или шайб, создают серебряные контакты с помощью специальных паст. Для повышения стабильности параметров элементы подвергают термообработке при температуре 200—300° С. Окончательная стабилизация параметров элементов производится путем прогрева элементов в течение сотен часов при максимальной рабочей температуре.

Исходным материалом для получения бусинковых термочувствительных элементов служит тестообразная жидкая масса, изготовляемая на основе порошкового материала и смешанного с ним соответствующего растворителя. Параметры терморезистивного элемента и его размеры фиксируют после проведения термического отжига в окислительной атмосфере при температуре около 1 100° С и последующей термообработки. Когда терморезистивный элемент получен, его защищают от воздействия внешней среды специальными лаками и компаундами, а в ряде случаев помещают в стеклянный или металлический корпус.

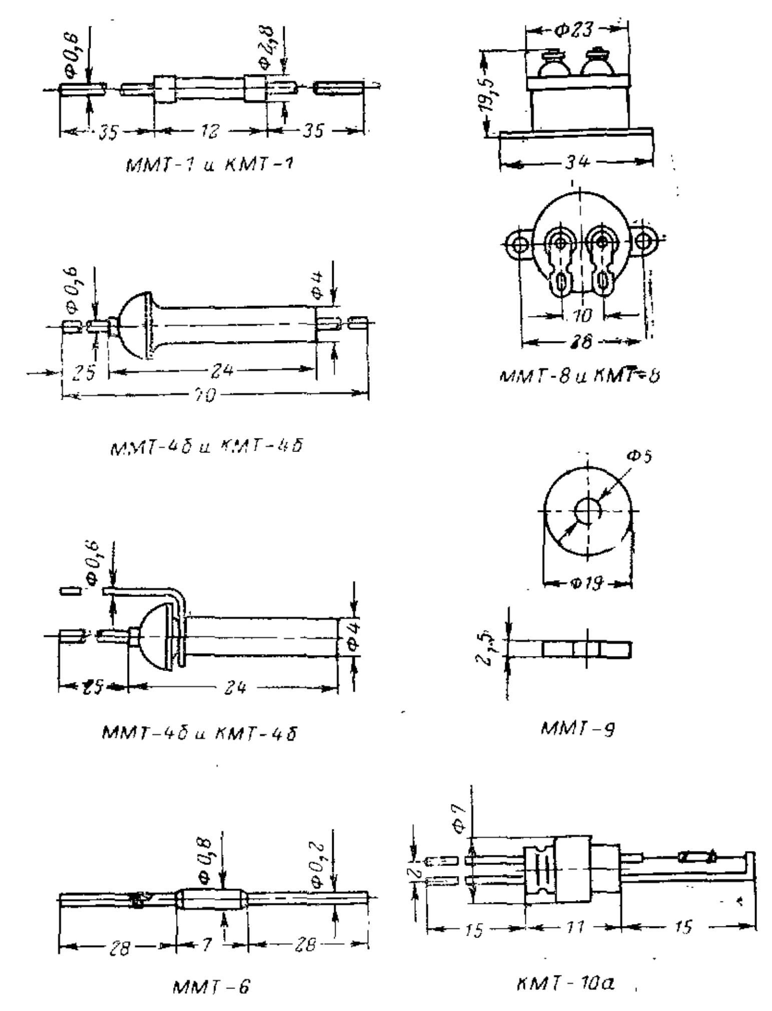
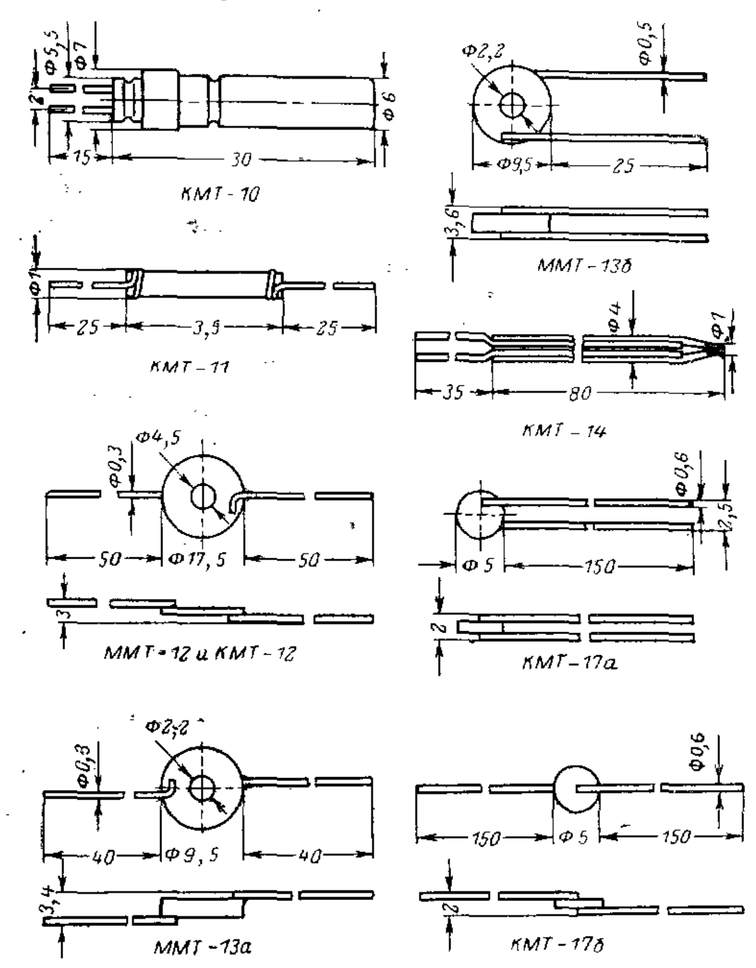


Рис. 3. Конструкции термо-

После конструктивного оформления терморезисторов измеряют их основные параметры. При измерении сопротивления необходимо поддерживать температуру терморезистора с высокой точностью (0,05—0,1° С), поскольку сопротивление является функцией температуры.

Кроме перечисленных материалов из окислов марганца, меди и кобальта, в качестве исходных компонентов для терморезисторов используют также окислы титана, ванадия, железа. При изменении соотношения компонентов соответствующих материалов можно получить заданные значения удельного сопротивления и ТКС. Использованием указанных компонентов и несколько видоизмененных способов смешения и термического обжига удалось создать терморезисторы с косвенным подогревом типа ТКП.



резисторов ММТ и КМТ.

Большой интерес для производства терморезисторов представляют тройные марганцевые системы окислов, поскольку электропроводность таких материалов слабо зависит от примесей. Это дает возможность получать на основе этих материалов терморезисторы с малым разбросом по сопротивлению и ТКС, что позволяет обеспечить массовый выпуск терморезисторов с заданными электрическими параметрами.

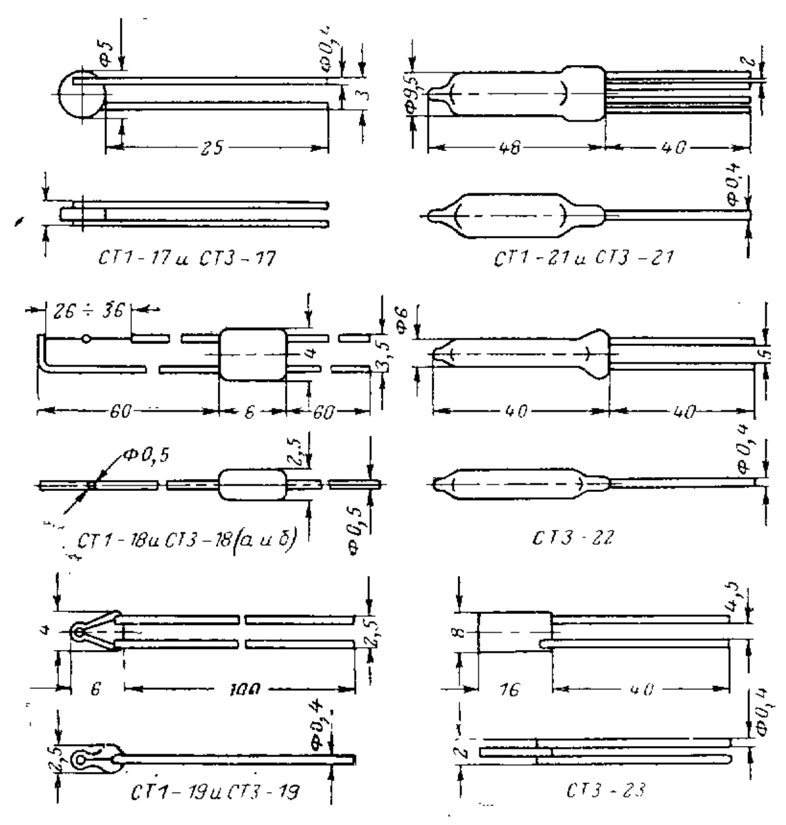


Рис. 4. Конструкции терморезисторов СТ1 и СТ3.

В последние годы открылось новое перспективное направление — конструирование терморезисторов с положительным ТКС. Терморезистивные элементы с положительным ТКС выполняют на основе титанато-бариевой керамики, сопротивление которой значительно снижено добавлением примесей редкоземельных элементов. Титанат бария $BaTiO_3$ — диэлектрик. Его удельное сопротивление при комнатной температуре весьма велико: 10^{10}—10^{12} *ом·см*. При введении в титанат бария таких примесей, как лантан или церий, в ничтожно малых количествах (0,1—0,3 атомного процента) его удельное сопротивление

уменьшается до 10—100 *ом·см*. Если ввести эти примеси в титанат бария, то его сопротивление в узком интервале температур увеличится на несколько порядков.

Промышленность в настоящее время выпускает большой ассортимент полупроводниковых терморезисторов самого различного конструктивного оформления (рис. 3—5). Наиболее распространенные терморезисторы изготовляют на основе медно-марганцевых (ММТ и СТ3), кобальто-марганцевых (КМТ и СТ1) и медно-кобальто-марганцевых (СТ3) оксидных полупроводников.

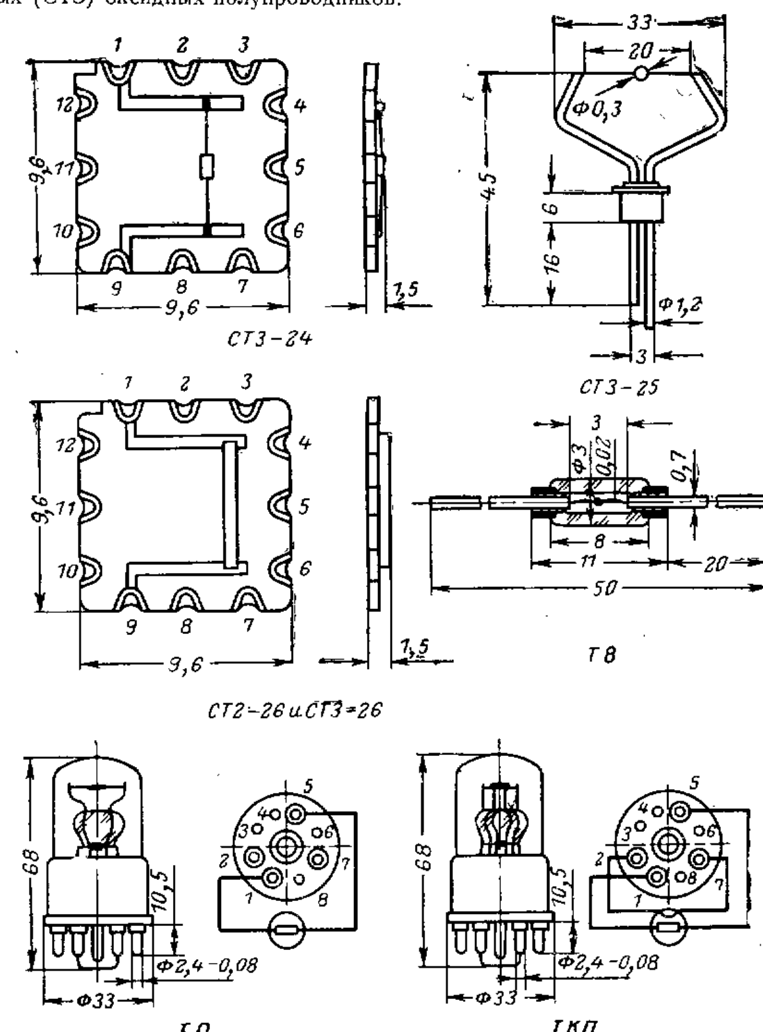


Рис. 5. Конструкции терморезисторов СТ3, Т8, ТП и ТКП.

Конструктивное оформление терморезисторов весьма разнообразно: они выполняются в виде цилиндрических стержней (КМТ-1, ММТ-1, КМТ-4, ММТ-4), дисков (СТ1-17, СТ3-17, СТ5-1), миниатюрных бусинок (СТ1-18, СТ1-19 и др.) и плоских прямоугольников (СТ3-23). Для защиты от воздействия внешней среды поверхность терморезистивных элементов покрывают специальными эмалями и лаками. Особенностью бусинковых терморезисторов типов СТ1-18, СТ3-18 и СТ3-25 является то, что термочувствительный элемент для защиты от внешних воздействий покрыт тонким слоем стекла, а тонкие платиновые контакты приварены или припаяны (СТ3-25) к траверсам из толстой проволоки.

Терморезисторы типов СТ1-18 и СТ3-18 имеют бусинку диаметром 0,5 *мм* (выводы диаметром до 0,05 *мм*), терморезисторы типов СТ3-25—0,3 и 0,03 *мм* соответственно. Терморезисторы типов КМТ-14, СТ1-19 и СТ3-19 имеют герметичную конструкцию. Термочувствительный элемент резистора КМТ-14 — бусинка диаметром не более 0,5 *мм*, нанесенная на две параллельные платиновые проволоки, приваренные к платинитовым выводам диаметром 0,4 *мм*. Бусинка герметизирована в коническом конце стеклянной трубки, которая является корпусом терморезистора.

Термочувствительные элементы терморезисторов СТ1-19 и СТ3-19 помещены в конец миниатюрной капсулы, которая защищает термочувствительный элемент и места соединения контактов с выводами. Терморезисторы СТ1-19 и СТ3-19 имеют меньшие размеры по сравнению с терморезисторами КМТ-14, более стойки к механическим нагрузкам.

Терморезисторы ММТ-1 и КМТ-1 предназначены для работы в закрытых сухих помещениях, ММТ-4 и КМТ-4 герметизированы, работоспособны в условиях с повышенной влажностью и даже в жидкой среде.

Промышленность выпускает также измерительные терморезисторы, предназначенные для измерений в маломощных цепях сверхвысокочастотных колебаний. Для этой цели используют терморезисторы типа Т8. Чувствительный элемент этих терморезисторов — бусинка из полупроводникового материала, укрепленная на тонких проводниках в стеклянной оболочке или без нее.

Термисторы типа ТП (ТП2/0,5, ТП2/2, ТП6/2 — цифра в числителе указывает номинальное напряжение в вольтах, а знаменатель — средний рабочий ток в миллиамперах) используют для стабилизации напряжения в цепях постоянного или переменного тока с частотой до 150 *кгц*. По конструкции они представляют собой круглые опрессованные стержни, заключенные в стеклянный баллон (рис. 5), воздух из которого откачивают до давления около 10^{-5} *мм рт. ст.*

Терморезисторы ТКП, СТ1-21, СТ3-21 и СТ3-27 применяют в радиотехнических устройствах и схемах автоматики в качестве регулируемых бесконтактных резисторов. Эти терморезисторы имеют косвенный подогрев от специальной спирали, при изменении тока в которой происходит плавное изменение сопротивления терморезистора. Такие терморезисторы используют в случаях, когда необходимо отделить управляемую цепь от управляющей.

Рабочий элемент и подогреватель терморезисторов типа ТКП помещены в стеклянный баллон с нормальным октальным поколем. Разработанные в последние годы новые типы терморезисторов СТ1-21, СТ3-21 и СТ3-27 имеют более совершенную конструкцию по сравнению с терморезисторами ТКП.

ПАРАМЕТРЫ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ И УСЛОВИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Номинальное сопротивление — сопротивление терморезистора при определенной температуре окружающей среды (для большинства типов терморезисторов указывают пределы номинальных сопротивлений при 20° С).

Большинство типов терморезисторов изготовляют с допустимым отклонением от номинала ±20%. По особому заказу терморезисторы могут быть выполнены с меньшими отклонениями (±5 и 10%).

Измерение сопротивления большинства терморезисторов проводят в ультратермостатах с погрешностью не более ±1% при температуре 20±1° С. Для ряда типов терморезисторов (КМТ-14, СТ1-18, СТ1-19) номинальное сопротивление указывают при температуре +150° С.

Температурная зависимость сопротивления является основной характеристикой терморезистора. Этой зависимостью определяются остальные характеристики терморезистора. На рис. 2,*а* приведены характерные зависимости сопротивления терморезисторов с отрицательным ТКС от температуры. Сопротивление терморезистора с отрицательным ТКС в рабочих интервалах температур изменяется по экспоненциальному закону:

$$R = Ae^{\frac{B}{T}},$$

где A и B — постоянные; T — абсолютная температура, °К.

Как правило, известно сопротивление терморезистора при 20° С. Сопротивление терморезистора при другой температуре среды можно рассчитать по формуле

$$R_T = R_{T0}e^{\frac{B(T_0-T)}{T_0T}},$$

где R_{T0} — величина сопротивления при 293° К (т. е. 20° С);
e — основание натуральных логарифмов (e=2,718);
T — температура, при которой определяют величину сопротивления, °К;
T_0 = 293° К.

Постоянную B можно легко рассчитать, измерив сопротивление терморезистора при температурах T_0 и T:

$$B = 2,303\frac{\lg R_{T0} - \lg R_T}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}}.$$

Для измерения R_{T0} и R_T терморезистор помещают в ультратермостат, в котором температуры T_0 и T должны поддерживаться и измеряться с точностью не ниже 0,05° С.

ТКС характеризует изменение сопротивления терморезистора под действием температуры:

$$\text{ТКС} = \frac{1}{R}\cdot\frac{dR}{dT};\quad \text{ТКС} = -\frac{B}{T^2}.$$

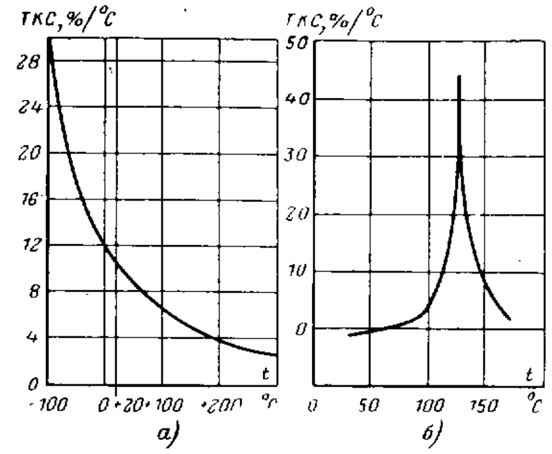


Рис. 6. Зависимость ТКС терморезисторов от температуры.

а — для терморезистора с отрицательным ТКС; *б* — для терморезистора с положительным ТКС.

При увеличении температуры отрицательный ТКС по абсолютной величине уменьшается (рис. 6,*а*). У терморезисторов с положительным ТКС резко увеличивается ТКС в узком интервале температур (рис. 6,*б*).

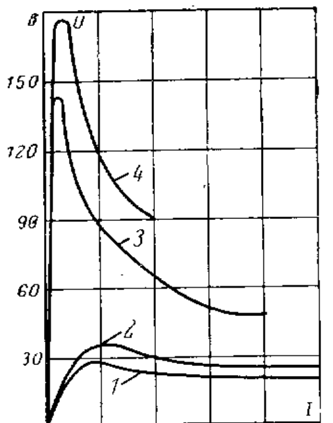


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики терморезисторов, находящихся в спокойном воздухе при 20° С.

1 — КМТ-1 (20 *ком*); *2* — КМТ-4 (20 *ком*); *3* — КМТ-1 (600 *ком*); *4* — КМТ-4 (600 *ком*).

Важнейшая характеристика терморезистора — его статическая вольт-амперная характеристика, показывающая зависимость протекающего через него тока от величины приложенного напряжения при условии теплового равновесия между терморезистором и окружающей средой.

При протекании тока в терморезисторе выделяется тепло и его температура повышается. Сопротивление терморезистора определяется температурой среды и температурой перегрева. Так как сопротивление терморезистора связано с температурой нелинейной зависимостью, его вольт-амперная характеристика нелинейна (рис. 7). Вольт-амперные характеристики терморезисторов снимают в спокойном воздухе.

Вид вольт-амперной характеристики терморезистора определяется его конструкцией, сопротивлением элемента, свойствами используемого материала, средой, в которую помещен элемент, и степенью тепловой связи между терморезистором и

окружающей средой. У терморезисторов с косвенным подогревом вид вольт-амперной характеристики определяется величиной тока, протекающего по спирали нагрева (рис. 8).

Максимальная мощность рассеяния — мощность, при которой терморезисторы, находящиеся в спокойном воздухе при температуре 20±1° С, при протекании тока разогреваются до максимальной рабочей температуры.

Максимальной рабочей температурой называется температура, при которой характеристики терморезистора остаются стабильными длительное время (в течение указанного срока службы). При более высоких температурах происходят необратимые изменения, при которых терморезистор изменяет свои параметры свыше допустимых значений.

Значение максимальной рабочей температуры определяется свойствами как материала, из которого выполнен терморезистивный элемент, так и других материалов конструкции. В ряде случаев допустимая рабочая температура ограничивается температурой размягчения припоя, используемого для создания контактов к терморезистивному элементу.

Рис. 8. Вольт-амперные характеристики терморезистора СТ1-21 с косвенным подогревом при 25° С для различных значений тока подогрева R=100 *ком*.

1 — 0; *2* — 10 *ма*; *3* — 15 *ма*; *4* — 20 *ма*; *5* — 25 *ма*.

Коэффициент рассеяния H численно равен мощности, рассеиваемой на терморезисторе при разности температур образца и окружающей среды в 1° С.

Коэффициент энергетической чувствительности G численно равен мощности, которую необходимо подвести к терморезистору для уменьшения его сопротивления на 1%. Значение коэффициента энергетической чувствительности определяется режимом работы терморезистора.

Коэффициент энергетической чувствительности и коэффициент рассеяния зависят от свойств материала терморезистора и характера его теплообмена со средой.

Постоянная времени τ — время, в течение которого температура терморезистора становится равной 63° С при перенесении его из воздушной среды с температурой 0° С в воздушную среду с температурой 100° С.

Следовательно, о степени тепловой инерционности терморезистора судят по величине постоянной времени τ. Тепловая инерционность терморезистора определяется его конструкцией и размерами, а также зависит от теплопроводности окружающей среды. С увеличением размеров соответственно увеличивается и постоянная времени терморезистора.

У терморезисторов с косвенным подогревом тепловая инерционность характеризуется двумя постоянными времени. Одна постоянная времени характеризует время, в течение которого температура

Таблица 1

Тип терморезистора	Пределы номинального сопротивления*, *ком*, при 20° С	Допуск, %, не более	Максимальная мощность рассеяния, *мвт*, не более		Интервал рабочих температур, °С	Температурный коэффициент сопротивления, %/°С, при 20°С	Постоянная *В*, °К	Коэффициент рассеяния *Н*, *мвт*/°С	Коэффициент энергетической чувствительности *G*, *мвт*	Постоянная времени τ, *сек*, не более	Срок службы не менее, *ч*	Срок хранения, лет
			при $T_{ном}$	при $T_{макс}$								
КМТ-1	22—1 000	20	1 000	0,3	—60÷ +180	4,2—8,4	3 600—7 200	5	1	85	5 000	10
ММТ-1	1—220	20	600	0,4	—60÷ +125	2,4—5,0	2 060—4 300	5	1,3	85	5 000	10
КМТ-4 (а и б)	22—1 000	20	800	0,3	—60÷ +125	4,2—8,4	3 600—7 200	6	1	115	5 000	10
ММТ-4 (а и б)	1—220	20	700	0,5	—60÷ +125	2,4—5,0	2 060—4 300	6	2	115	5 000	10
ММТ-6	10—100	20	50	0,1	—60÷ +120	≥2,4	≥2 060	1,7	0,3	35	5 000	2
КМТ-8	0,1—10	10; 20	600	1	—40÷ +70	4,2—8,4	3 600—7 200	13	3	—	5 000	8,5
ММТ-8	0,001—1,0	10; 20	600	2	—40÷ +70	2,4—4,0	2 050—3 430	13	4	—	5 000	8,5
ММТ-9	0,01—4,7	10; 20	—	2	—60÷ +125	2,4—5,0	2 060—4 300	—	10	—	5 000	8,5
КМТ-10 (а)	100—3 300	20	**	**	0÷ +120	≥4,2	≥3 600	1	—	75	**	3
КМТ-11	100—3 000	20	**	**	0÷ +120	≥4,2	≥3 600	0,8	—	10	**	3
КМТ-12	0,1—10	30	—	0,3	—40÷ +120	≥4,2	≥3 600	7	1,3	—	5 000	6,5
ММТ-12	0,0047—1,0	30	—	0,5	—60÷ +120	2,4—4,0	2 060—3 430	7	2,3	—	5 000	6,5
КМТ-14	0,51; 0,91; 160; 200; 330; 4 300; 7 500 (при 150° С)	30	100	0,03	—10÷ +300	2,3—3,9 (при 150° С)	4 100—7 000	0,8	0,1	***	3 000	1,5
КМТ-17 (а и б)	0,3—20	10; 20	500	0,1	—60÷ +155	≥4,2	≥3 600	10	0,5	30	3 000	4

* Промежуточные значения номинальных величин сопротивления соответствуют шкале ГОСТ 2825-63.

** Рассчитаны на 200 аварийных срабатываний системы теплового контроля при максимальной мощности рассеяния на ТР не более 0,25 *вт* в течение 2 *сек*.

*** 10 *сек* в режиме нагрева и 60 *сек* в режиме охлаждения.

Таблица 2

Тип терморезистора	Пределы номинального сопротивления, *ком*, при 20° С	Допуск, %, не более	Максимальная мощность рассеяния, *мвт*, не более		Интервал рабочих температур, °С	ТКС, %/°С при 20°С,	Постоянная *В*, °К	Коэффициент рассеяния *Н*, *мвт*/°С	Коэффициент энергетической чувствительности *G*, *мвт*	Постоянная времени τ, *сек*, не более	Срок службы, *ч*, не менее	Срок хранения, лет
			при $T_{ном}$	при $T_{макс}$								
СТ1-17	0,3—22	10; 20	500	0,1	—60 ÷ +100	4,2—7,0	3 600—6 000	10	0,5	30	3 000	3
СТ3-17	0,033; 0,047; 0,068; 0,01; 0,15; 0,22; 0,33	10; 20	500	0,2	—60 ÷ +100	3,0—4,5	2 580—3 860	10	0,8	30	5 000	3
СТ1-18	1,5; 2,2; 22; 33; 1 500; 2 200 при 150° С	20	45	0,03	—60÷ +300	2,25—5,0	4 050—9 000	0,2	0,08	1	5 000	3
СТ3-18	0,68; 1,0; 1,5; 2,2; 3,3	20	15	0,02	—90÷ +125	2,5—4,1	2 250—3 520	0,18	0,05	1	3 000	3
СТ1-19	3,3; 4,7; 6,8; 10; 100; 150; 1 500; 2 200 при 150°С	20	60	0,05	—60÷ +300	2,35—4,0 (при 150° С)	4 230—7 200	0,6	0,15	3	3 000	3
СТ3-19	2,2; 10; 15	20	45	0,04	—90÷ +125	3,4—4,5	2 900—3 850	0,5	0,12	3	3 000	3
СТ3-22	1 при 25° С	30	8—12*	6—9*	—60÷ +85	3,05—4,15	2 700—3 700	0,06	—	15	10 000	7
СТ3-23	0,0022; 0,0027; 0,0033; 0,0039; 0,0047	10; 20	—	3	0÷ +125	3,05—3,75	2 600—3 200	9	2,5	—	5 000	3
СТ3-24	0,68; 1,0; 2,2; 3,3	20	—	—	—60÷ +85	2,6—4,1	2 250—3 520	—	0,15	—	5 000	3
СТ3-25	1,5; 2,2; 3,3	20	8	0,01	—100÷ +125	3,05—3,75	2 600—3 200	0,08	0,02	0,4	3 000	3
СТ2-26	1,0—100	20	—	—	—60÷ +125	2,4—5,0	2 060—4 300	—	—	—	5 000	3
СТ3-26	0,1—0,68	20	—	—	—60÷ +125	2,4—5,0	2 060—4 300	—	—	—	5 000	3

* Мощность, при которой сопротивление полупроводникового элемента равно 20 *ом*.

Таблица 3

Параметры терморезисторов	Терморезисторы косвенного подогрева типа СТ		
	СТ1-21	СТ3-21	СТ3-27 (газонаполненный)
Номинальное сопротивление термочувствительного элемента без подогрева при 25° С, *ком*	33, 68, 100, 150	0,68; 1,0; 1,5; 6,8; 10; 15	2,2
Допуск по сопротивлению, %, не более	20	20	20
Минимальное сопротивление термочувствительного элемента при максимальном токе подогрева и температуре окружающего воздуха 25° С, *ом*	150, 220, 300, 400	7, 10, 15, 40, 50, 60	30
Постоянная *B*, °К	3 700—4 100	3 100—3 600	3 000—3 400
Номинальное сопротивление подогревателя, *ом*	100	100	100
Допуск по сопротивлению подогревателя, %, не более	10	10	10
Интервал рабочих температур, °С	—60÷ +85	—60÷ +85	—60÷ +85
Максимальный ток в цепи подогревателя, *ма*	25	25	26
Максимально допустимая мощность рассеяния при 25° С, *мвт*, не более	60	60	70
Коэффициент тепловой связи, не более	0,8	0,8	0,5
Постоянная времени (первая), *сек*	15—40	15—40	4—6
Срок службы, *ч*	5 000	5 000	—
Срок хранения, лет	5	5	—

Таблица 4

Тип терморезистора	Условия эксплуатации терморезисторов										
	Относительная влажность окружающего воздуха, %, не более при 25° С	Атмосферное давление		Вибрация				Удары		Линейные нагрузки с ускорением *g*	Вес, *г*, не более
				при креплении (пайкой) за выводы		при креплении за корпус					
		от *кГ/см²*	до *мм рт. ст.*	диапазон частот, *гц*	ускорение *g*	диапазон частот, *гц*	ускорение *g*	Ускорение *g*	Количество		
КМТ-1	80	10	2	5—600	7,5	5—1 000	7,5	35 75	10 000 4 000	50	0,6
ММТ-1	80	10	2	5—600	7,5	5—1 000	7,5	35 75	10 000 4 000	50	0,6
КМТ-4 (а и б)	98*	10	2	5—200	4	5—1 000	7,5	35 75	10 000 4 000	50	2,5
ММТ-4 (а и б)	98*	10	2	5—200	4	5—1 000	7,5	35 75	10 000 4 000	50	2,5
ММТ-6	80	10	2	45—55	10	—	—	—	—	—	0,05
КМТ-8	98*	10	0,05	—	—	5—1 000	7,5	35 75	10 000 4 000	50	20
ММТ-8	98*	10	0,05	—	—	5—1 000	7,5	35 75	10 000 4 000	50	20
ММТ-9	80	10	2	—	—	5—600	7,5	35	10 000	50	3,4
КМТ-10 (а)	80	1	—	40—50	10	—	—	—	—	—	2
КМТ-11	80	1	—	40—50	10	—	—	—	—	—	0,0
КМТ-12	80	1	10	20	10	—	—	—	—	—	1,5
ММТ-12	80	1	10	20	10	—	—	—	—	—	1,5
ММТ-13 (а и б)	80	10	2	—	—	5—600	7,5	35	1 000	50	12,0

Продолжение табл. 4

Тип терморезистора	Условия эксплуатации терморезисторов: Относительная влажность окружающего воздуха, %, не более при 25° С	Атмосферное давление: от кГ/см²	Атмосферное давление: до мм рт. ст.	Вибрация при креплении (пайкой) за выводы: диапазон частот, гц	Вибрация при креплении (пайкой) за выводы: ускорение g	Вибрация при креплении за корпус: диапазон частот, гц	Вибрация при креплении за корпус: ускорение g	Удары: Ускорение g	Удары: Количество	Линейные нагрузки с ускорением g	Вес, г, не более
КМТ-14	98*	1	5	—	—	10—80	10	12	5 000	—	4
КМТ-17 (а и б)	80	10	2	—	—	10—1 000	7,5	35	10 000	25	1,5
СТ1-17	98*	10	2	10—80	4,5	10—1 000	7,5	35	10 000	25	0,2
СТ3-17	98*	10	2	10—80	4,5	10—1 000	7,5	35	10 000	25	0,2
СТ1-18	80	1	2	—	—	10—200	4	12	5 000	9	0,003***
СТ3-18	80	1	2	—	—	10—200	4	12	5 000	9	0,003***
СТ1-19	80	1	2	—	—	10—1 000	15	12	5 000	9	0,3
СТ1-21	98*	**	**	—	—	5—60	2,5	12	5 000	9	2,8
СТ3-19	80	1	2	—	—	10—1 000	15	12	5 000	9	0,3
СТ3-21	98*	**	**	—	—	5—80	2,5	12	5 000	9	2,8
СТ3-22	98*	1	400	—	—	10—80	2,5	12	5 000	9	4,0
СТ3-23	98*	1	720	—	—	10—80	2,5	12	5 000	9	1,5
СТ3-24	98*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3
СТ3-25	80	1	0,1	—	—	10—80	2,5	12	5 000	35	2,5
СТ2-26	98*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3
СТ3-26	98*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3

* При температуре +40° С.
** Давление от 780 до 400 *мм рт. ст.*
*** Вес указан без траверс.

рабочего элемента терморезистора изменяется в *e* раз по сравнению с установившимся значением при мгновенном изменении мощности в спирали подогрева. Другая постоянная времени характеризует задержку, с которой происходит изменение температуры термочувствительного элемента по отношению к изменению температуры подогревателя.

Одной из важных характеристик, определяющих качество выполнения терморезистора и совершенство технологии его изготовления, является стабильность сопротивления при эксплуатации. Полупроводниковые терморезисторы имеют высокую стабильность параметров, если при эксплуатации их температура не превышает максимальной. При эксплуатации в допустимых режимах терморезисторы, как правило, работают значительно дольше сроков, указанных в технических условиях.

Основные параметры полупроводниковых терморезисторов типов КМТ, ММТ, СТ приведены в табл. 1—3, а условия эксплуатации — в табл. 4. Области применения этих типов терморезисторов весьма широки (табл. 5).

Терморезисторы типа Т8 (табл. 6) находят широкое применение в качестве чувствительных элементов в радиотехнической и индикаторной аппаратуре при измерениях мощности от долей микроватта до нескольких милливатт.

Терморезисторы применяют и для быстрых измерений температуры в схемах, когда необходима малая постоянная времени.

Параметры терморезисторов типа ТП, используемых, как уже указывалось, для стабилизации напряжения в цепях электронной и радиотехнической аппаратуры, приведены в табл. 7.

Основные параметры терморезисторов косвенного подогрева приведены в табл. 3 и 8.

Таблица 6

Параметры терморезисторов	Тип терморезистора: Т8Д	Т8Е	Т8М	Т8Р	Т8С1	Т8С2	Т8С3	Т9	Т8С1М	Т8С2М	Т8С3М	ТП1	ТП2
Сопротивление в рабочей точке при 20° С, *ом*	150	150	200	125	120	150	150	125	120	150	150	125	150
Максимальное значение мощности в рабочей точке при 20° С, *мвт*	15	10	11	12	24	19	23	19	24	19	23	11	17,5
Минимальное значение мощности в рабочей точке при 20° С, *мвт*	10	7	9	7	9,5	8	7	7	9,5	8	7	7	13,5
Чувствительность в рабочей точке, *ом/мвт*	20—30	30—70	66—90	10—19	10—40	12—25	10—50	10—40	10—40	12—25	10—50	—	—
Постоянная В, °К	От 1 500 до 5 000												
Температурный коэффициент, %/°С	От —1,0 до —5,8												
Постоянная времени, *сек*	От 0,5 до 2,5												

Таблица 5

Область применения	Тип терморезистора
Для температурной компенсации в электронных схемах	ММТ-8; ММТ-9; ММТ-12; ММТ-13; КМТ-8; КМТ-12; СТ1-17; СТ3-17; СТ3-23
Для работы в схемах в качестве бесконтактных регулируемых резисторов	КМТ-10; КМТ-11; СТ1-21; СТ3-21; СТ3-22; СТ3-27; СТ5-1
Для микромодулей и гибридных схем	СТ2-26; СТ3-24; СТ3-26
Для измерения и регулирования температуры	ММТ-1; ММТ-4; ММТ-6; КМТ-1 КМТ-4; КМТ-14; КМТ-17; СТ1-17 СТ1-18; СТ1-19; СТ3-17; СТ3-18 СТ3-25

Таблица 7

Параметры терморезисторов	Тип терморезистора		
	ТП 2/0,5	ТП 2/2	ТП 6/2
Номинальное напряжение, *в*	2,0	2,0	6,0
Общий предел стабилизации, *в*	1,6—3,0	1,6—3,0	4,2—7,8
Рабочая область по току, *ма*	0,2—2,0	0,4—6,0	0,4—6,0
Средний рабочий ток, *ма*	0,5	2,0	2,0
Максимально допустимое изменение подводимого напряжения, *в*	0,4	0,4	1,2
Максимальная кратковременная перегрузка по току, *ма*	4,0	12,0	12,0
Максимальная длительность перегрузки, *сек*	2	2	2
Сопротивление изоляции между рабочими выводами при относительной влажности 95%, *Мом*	5	5	5
Постоянная *В*, °К	От 3 900 до 15 800		
Срок службы, *ч*	5 000	5 000	5 000
Диаметр рабочего элемента, *мм*	От 0,2 до 0,3		
Длина рабочего элемента, *мм*	От 0,6 до 1,3		
Вес, *г*	45	45	45

Промышленность выпускает терморезисторы с положительным температурным коэффициентом типа СТ5-1, которые имеют следующие электрические параметры:

Величина сопротивления:
при 20—25° С . . . . 20—150 *ом*
при 190—200° С . . . . 30 *ком*
Кратность изменения сопротивления . . . $\geqslant 10^3$
Температурный интервал положительного ТКС 120—190° С
Температурный интервал максимального ТКС 120—130° С

Средний температурный коэффициент сопротивления в интервале 125—135° С . . $\geqslant 20\%/°С$
Максимально допустимая мощность рассеяния . . . . 0,8 *вт*
Постоянная времени . . . . 10—15 *сек*

Таблица 8

Параметры терморезисторов	Терморезисторы косвенного подогрева типа ТКП			
	ТКП-20	ТКП-50А	ТКП-50Б	ТКП-300
Сопротивление в холодном состоянии, *ком*	0,5	2,0	0,75	10
Температурный коэффициент, %/°С	−2,0	−2,3	−2,3	−3,5
Номинальная мощность подогрева, *мвт*	160	160	160	20
Сопротивление терморезистора при номинальной мощности, *ом*	20	50	50	300
Постоянная *В*, °К	1 850	3 200	3 200	3 000
Пробивное напряжение между рабочим телом и подогревателем, *в*	150	150	150	50
Максимальный рабочий ток через подогреватель, *ма*	40	35	35	20
Номинальный ток через подогреватель, *ма*	30	25	25	15
Сопротивление подогревателя при токе через обмотку 10 *ма*, *ом*	40	40	40	30
Коэффициент энергетической чувствительности, *мвт*	0,00295	0,04654	0,04654	0,0919
Максимальная мощность в обмотке подогревателя при максимальном рабочем токе, *мвт*	180±40	160±40	160±40	20±4
Максимальный ток через подогреватель, *ма*	49	45	45	25
Постоянная времени, *сек*	143	114	114	13,5
Срок службы, *ч*	3 000	3 000	3 000	3 000

Температурная зависимость сопротивления и вольт-амперная характеристика терморезистора СТ5-1 показаны на рис. 9.

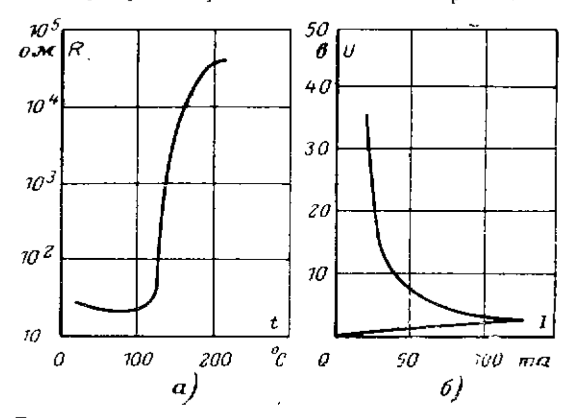


Рис. 9. Зависимость сопротивления от температуры (*а*) и вольт-амперная характеристика терморезистора СТ5-1 (*б*).

КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

В настоящее время промышленность выпускает десятки различных типов фоторезисторов. Наибольшее распространение получили фоторезисторы на основе сульфида кадмия, селенида кадмия и сернистого свинца.

В соответствии с используемым светочувствительным материалом и конструктивным оформлением фоторезисторам даны обозначе-

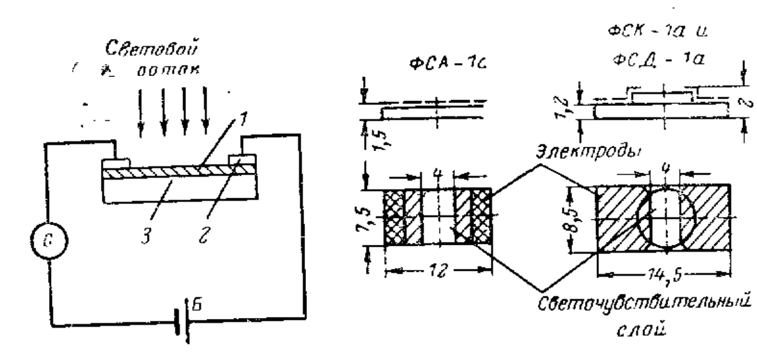


Рис. 10. Устройство фоторезистора и способ его включения.

1 — светочувствительный полупроводниковый слой; *2* — металлические электроды; *3* — изоляционное основание; *Г* — гальванометр; *Б* — батарея.

Рис. 11. Устройство фоторезисторов типов ФСА-1а, ФСК-1а и ФСД-1а.

ния СФ и ФС (новое и старое). Буквами А, К, Д обозначается материал, используемый для светочувствительного элемента (А — PbS; К — CdS; D — CdSe). В новых обозначениях буквы заменены цифрами, которые ставятся после индекса СФ. Цифры характеризуют конструктивное оформление фоторезистора. Иногда перед цифрой может стоять буква Г, обозначающая герметизированную конструкцию. Принципиальное устройство полупроводникового фоторезистора и его включение в электрическую цепь показаны на рис. 10.

Светочувствительные элементы обычно помещают в пластмассовый или металлический корпус, а когда необходимы малые габариты, обходятся без него. К фоторезисторам, выполненным без корпуса, относятся следующие типы: ФСА-1а, ФСК-5, ФСК-7а, ФСК-7б, ФСК-1а и ФСД-1а.

Светочувствительный элемент фоторезисторов ФСК-1а, ФСД-1а приклеивают к стеклянной подложке, на которую нанесены серебряные электроды для создания контактов (рис. 11). Фоторезисторы ФСК-5 часто комплектуют в специальные блоки (рис. 12).

На светочувствительный слой фоторезисторов ФСК-7 нанесены три электрода, что позволяет использовать их в качестве дифференциальных элементов. Фоторезисторы ФСК-7 выполняются в двух конструктивных вариантах, отличающихся один от другого конфигура-

цией и расположением электродов (рис. 12). Включение фоторезисторов ФСК-7 в электрическую цепь рекомендуется производить с помощью прижимных контактов.

Фоторезисторы типов ФСК-1, ФСК-2, ФСК-4а, ФСК-6, ФСА-1, ФСА-2 и ФСД-1 изготовляют в пластмассовом корпусе (рис. 13). У фоторезисторов ФСК-6 и ФСА-6, предназначенных для работы в отраженном свете, светочувствительный элемент представляет собой плоскую шайбу с отверстием, через которое свет поступает на

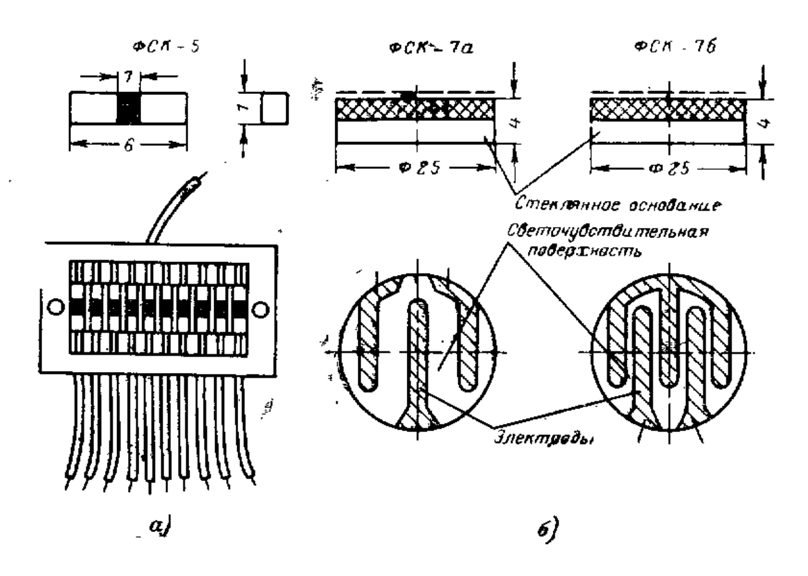


Рис. 12. Фоторезистор ФСК-5 и блок из 10 таких фоторезисторов (*а*) и дифференциальные фоторезисторы ФСК-7 (*б*).

отражающую поверхность, что дает возможность устанавливать фоторезисторы на близком расстоянии от контролируемого объекта. Дополнительно светочувствительный элемент у рассмотренных типов фоторезисторов защищен от воздействия внешней среды прозрачной лаковой пленкой, однако она не обеспечивает их надежной защиты в условиях повышенной влажности.

Фоторезисторы типов ФСК-1, ФСК-2, ФСА-6 и ФСК-6 могут быть включены в октальную радиопанель, а фоторезистор ФСД-1 — в семиштырьковую. Выводы фоторезисторов ФСК-4а рассчитаны на включение в специальную панель, так как фоторезисторы данного типа обычно комплектуют в блоки с большим числом элементов.

Герметизированные фоторезисторы используют в условиях повышенной влажности и в жидких непроводящих средах.

Три основных варианта герметизированных фоторезисторов показаны на рис. 14. Первая конструкция обычно используется для герметизации светочувствительных элементов фоторезисторов типов ФСК-1, ФСА-1 и ФСД-1, вторая — для герметизации элементов фоторезисто-

ров типа ФСА, имеющих значительные габаритные размеры, или двух элементов ФСК-1, третья — для дифференциальных элементов типа ФСК-7 (рис. 14). Фоторезисторы ФСА-2 имеют радиоламповый цоколь, обеспечивающий их включение в стандартную панель; у фоторезисторов ФСА-Г1, ФСК-Г1, ФСК-Г7 и ФСД-Г1 выводы выполнены в виде металлических лепестков.

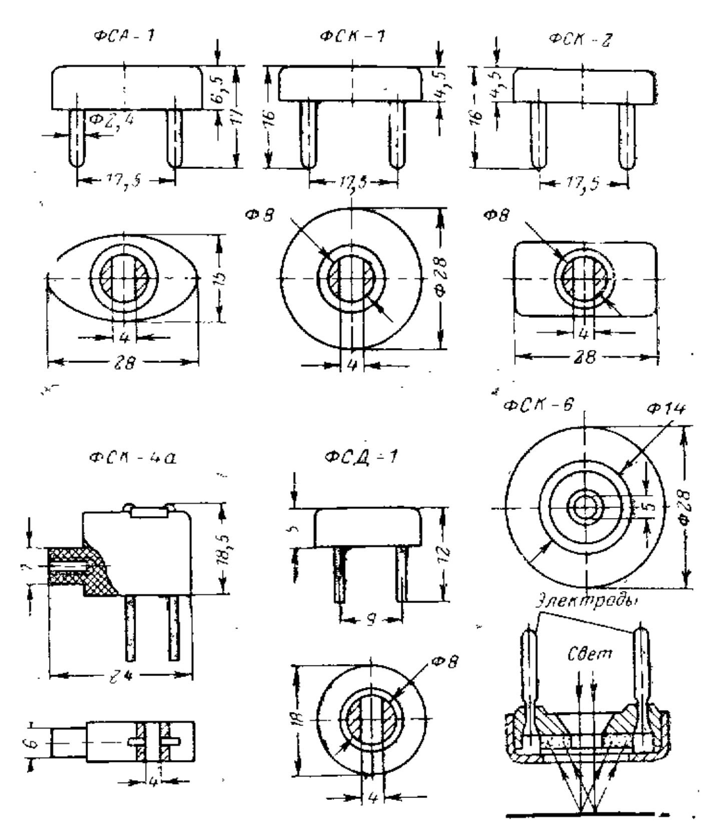


Рис. 13. Фоторезисторы в пластмассовом корпусе.

К миниатюрным фоторезисторам с влагозащитой светочувствительного элемента относятся пленочные селенисто-кадмиевые и сернисто-кадмиевые фоторезисторы следующих типов: СФ2-1, СФ2-2, СФ3-1, СФ3-2 и ФСК-П1 (рис. 15).

Фоторезисторы СФ3-1 и СФ2-1 имеют одинаковые пластмассовые основания, на торцах которых помещены миниатюрные светочувствительные элементы.

Селенисто-кадмиевые фоторезисторы типа СФ3-1 выполняют обычно в корпусе черного цвета, а сернисто-кадмиевые фоторезисторы СФ2-1 — в корпусе коричневого цвета. Светочувствительные элементы этих фоторезисторов защищены от воздействия внешней среды пленкой прозрачной эпоксидной смолы.

Фоторезисторы СФ3-2 имеют такое же внешнее конструктивное оформление, как и резисторы СФ2-2, и отличаются от последних кон-

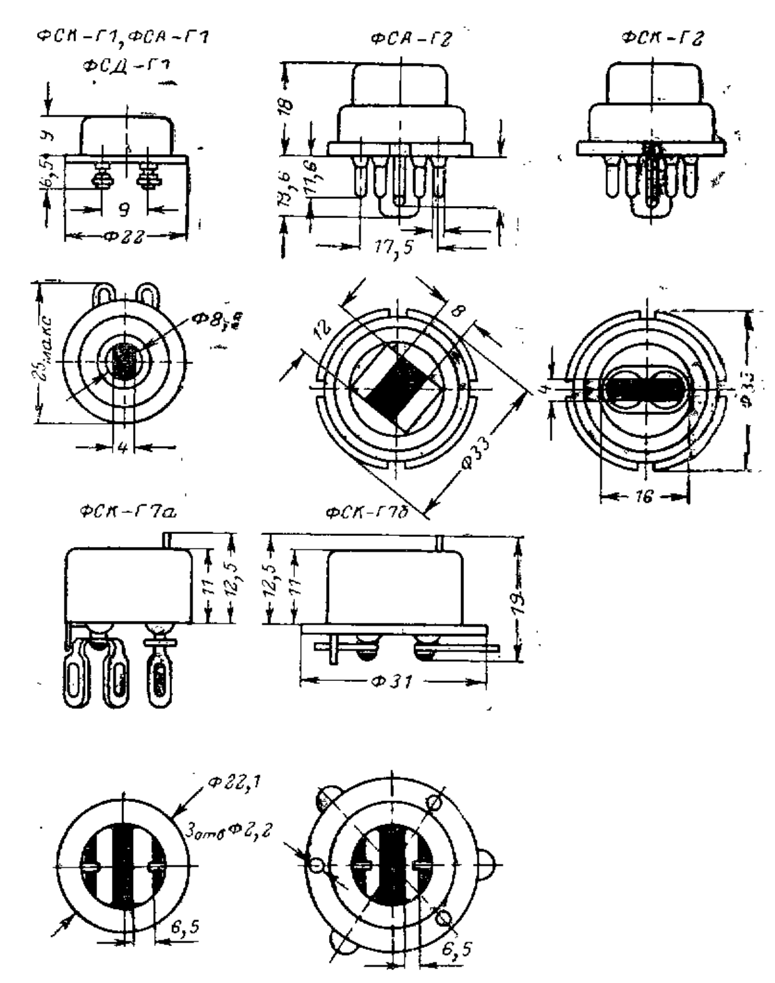


Рис. 14. Фоторезисторы в герметизированном корпусе.

фигурацией электродов, светочувствительным слоем и соответственно электрическими параметрами.

Светочувствительные элементы фоторезисторов ФСК-П1 и СФ2-2 укрепляют в пластмассовом корпусе с окном, которое соединено с корпусом с помощью эпоксидной смолы.

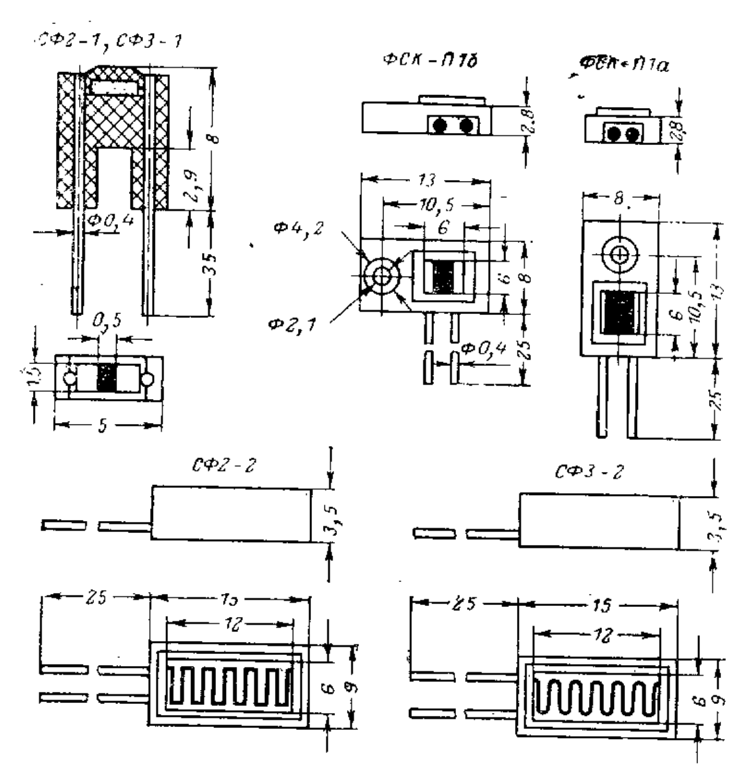


Рис. 15. Миниатюрные фоторезисторы.

ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

Основные параметры фоторезисторов: темновое сопротивление, кратность изменения сопротивления, темновой и световой токи, удельная чувствительность, допустимая мощность рассеяния, рабочее напряжение и инерционность. Кроме того, есть ряд других параметров, определяющих свойства и границы использования фоторезисторов. К таким параметрам относятся спектральная, частотная и световая чувствительности, температурный коэффициент фототока, интервалы рабочих температур.

Темновое сопротивление — сопротивление фоторезистора при отсутствии освещения.

Для сернисто-свинцовых фоторезисторов обычно указывают диапазон значений темнового сопротивления. Так, у фоторезистора ФСА-1а темновое сопротивление составляет от 22 *ком* до 1 *Мом*, а у ФСА-6 от 50 до 300 *ком*. Промежуточные значения темнового сопротивления соответствуют шкале ГОСТ 2825-63. Для большинства типов фоторезисторов устанавливают нижний предел темнового сопротивления (табл. 9).

Таблица 9

Параметры сернисто-кадмиевых и селенисто-кадмиевых фоторезисторов

Тип фоторезистора		Мощность рассеяния, *вт*	Рабочее напряжение, *в*	Темновое сопротивление, *Мом*, не менее	Темновой ток, *мка*		Световой ток, *ма*		Фототок, *ма*	$R_т/R_{св}$		Интегральная чувствительность, *а/лм*	*K*, *ма/лм·в*	*K*, *ма/лк·в*
					максимум (ТУ, ГОСТ)	среднее значение	минимум (ТУ, ГОСТ)	среднее значение	среднее значение	минимум (ТУ, ГОСТ)	среднее значение		среднее значение	среднее значение
Сернисто-кадмиевые	ФСК-1а	0,125	50	3,3	15	5	1,5	2	2	100	400	2,8	7	1,1
	ФСК-1	0,125	50	3,3	15	5	1,5	2	2	100	400	2,8	7	1,1
	ФСК-2	0,125	100	3,3	30	10	0,6	1	1	20	100	0,5	1,6	0,25
	ФСК-4а	0,125	25	1,6	30	5	1,5	2	2	50	400	3,0	15	0,24
	ФСК-5	0,05	50	10	5	1	0,08	1	1	17	1 000	5,0	220	2,2
	ФСК-6	0,20	50	3,3	15	5	1,5	2	2	100	400	0,28	6	0,13
	ФСК-7а	0,35	50	0,5	100	10	0,35	0,5	3	3,5	50	0,15	0,25	0,15
	ФСК-7б	0,35	10	0,1	100	10	0,8	3	3	8,0	300	3,6	7,5	0,6
	ФСК-Г7	0,35	50	5	10	5	1,0	2	2	100	400	0,7	1,8	0,46
	ФСК-Г1	0,12	50	3,3	15	5	1,5	2	2	100	400	2,1	7	1,1
	ФСК-Г2	0,2	50	1,6	30	10	2,5	6	4	83	800	2,1	7	1,1
	ФСК-П1	0,1	100	100	1	0,01	1—2	2	2	1 000—2 000	200 000	4,8	8	0,32
	СФ2-1	0,01	15	15	1	0,5	0,5	1	1	500	2 000	10	400	0,36
	СФ2-2	0,05	2	2	1	0,5—0,2	0,5	1,5	1,5	500	3 000	0,36	75	0,19
	СФ3-2	0,1	5	5	1	0,5	0,5	2	2	500	4 000	—	80	0,8
	ФСК-М1	$(3 \div 6) \cdot 10^{-2}$	70	700	—	0,1	—	0,3	—	—	10^{8}—10^{6}	0,5—3	$35—50 \cdot 10^{3}$	—
	ФСК-М2	$(3 \div 6) \cdot 10^{-2}$	70	70	—	1	—	1	—	—	10^{3}—10^{6}	3—10	$35—50 \cdot 10^{3}$	—
Селенисто-кадмиевые	ФСД-1а	0,05	20	2	10	1	1,5	3	3	150	2 000	15	30	4,8
	ФСД-1	0,05	20	2	10	1	1,5	3	3	150	2 000	15	30	4,8
	ФСД-Г1	0,05	20	2	10	1	1,5	3	3	150	2 000	15	30	4,8
	СФ3-1	0,01	15	30	0,5	0,01	0,75	1,5	1,5	1 500	150 000	20	600	0,54

Примечания: 1. Параметры резисторов ФСК-7а, ФСК-7б и ФСК-Г7 соответствуют одной половине фоторезистора.
2. Величина светового тока определена через 15 *сек* после воздействия 200 *лк*; значение темнового тока определено через 30 *сек* после снятия освещенности.

Кратность изменения сопротивления характеризует чувствительность фоторезистора и показывает степень изменения сопротивления фоторезистора под действием светового потока, т. е. это отношение

Таблица 10

Параметры сернисто-свинцовых фоторезисторов

Тип фоторезистора	Допустимая мощность рассеяния, *вт*	Рабочее напряжение, *в*	Темновое сопротивление, *ком*	$R_т/R_{св}$	Относительное изменение сопротивления, %	*K*, *мка/лм·в*
ФСА-1	0,01	2—100	22—1 000	⩾1,2	⩾20	500
ФСА-1а	0,01	2—100	22—1 000	⩾1,2	⩾20	500
ФСА-6	0,01	5—30	50—300	⩾1,2	⩾20	500
ФСА-Г1	0,01	4—40	47—470	⩾1,2	⩾20	500
ФСА-Г2	0,01	4—40	47—470	⩾1,2	⩾20	500

темнового сопротивления фоторезистора к сопротивлению при освещенности 200 *лк* от источника с цветовой температурой 2 850° К. В табл. 9 и 10 приведены кратности изменения сопротивления различных типов фоторезисторов. Сернисто-свинцовые фоторезисторы имеют кратность изменения сопротивления не ниже 1,2; у селенисто-кадмиевых фоторезисторов кратность изменения сопротивления достигает значений 10^5—10^6.

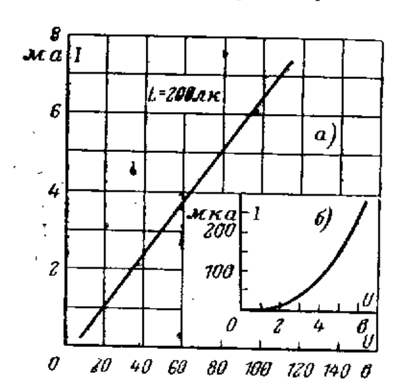


Рис. 16. Световые вольт-амперные характеристики фоторезисторов типа ФСК.

а — при больших напряжениях; *б* — при малых напряжениях.

Темновой и световой токи. Темновой ток фоторезистора обычно ограничивается по верхнему пределу. Минимальное значение темнового тока фоторезистора может быть на 1—2 порядка меньше указанного предельного значения. Световой ток в соответствии с ГОСТ 10675-63 определяется при рабочем напряжении и освещенности 200 *лк* от источника света с цветовой температурой 2 850° К. Обычно устанавливается только нижний предел светового тока. Средние значения фототоков промышленных типов фоторезисторов приведены в табл. 9.

Интегральная чувствительность фоторезистора—отношение добавочного тока, полученного при освещении фоторезистора, к величине светового потока. Из вольт-амперной характеристики фоторезистора (рис. 16) видно, что этот параметр условный, так как уровень фототока определяется приложенным напряжением. Поскольку зависимость фототока от приложенного напряжения у всех фоторезисторов практически линейна, удобно характеризовать фоторезистор удельной чувствительностью, т. е. чувствительностью на 1 *в* приложенного напряжения. Удельная чувствительность — отношение фототока к произведению падающего на фоторезистор светового потока и приложенного к нему напряжения:

$$K = \frac{\Delta i}{\Phi U},$$

где Δi — фототок, равный разности токов, протекающих по фоторезистору в темноте и при определенной (200 *лк*) освещенности, *мка* или *ма*;

Φ — падающий световой поток, *лм*;

U — напряжение, приложенное к фоторезистору, *в*.

В видимой части спектра величина светового потока обычно выражается в люменах и определяется соотношением

$$\Phi = 10^{-4}\ LS\ [лм],$$

где L — освещенность, *лк*;

S — размер светочувствительной площадки, *см²*.

Так как фототок фоторезистора нелинейно зависит от интенсивности светового потока, измерение его чувствительности производят при определенном световом потоке (обычно 200 *лк* от источника света с цветовой температурой 2 850° К).

Допустимая мощность рассеяния. Мощность, выделяющаяся на фоторезисторе в процессе работы, должна быть ограничена, чтобы его температура не превысила допустимого значения (допустимые мощности рассеяния фоторезисторов приведены в табл. 9 и 10). При повышении температуры окружающей среды допустимая электрическая нагрузка должна быть снижена (рис. 17).

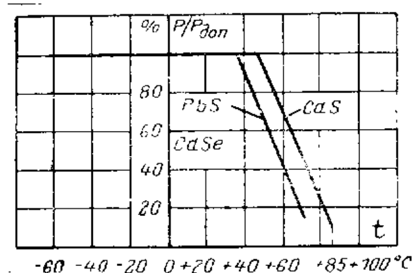


Рис. 17. Допустимые электрические нагрузки для фоторезисторов, выполненных из различных полупроводниковых материалов.

Рабочее напряжение фоторезистора — напряжение, при котором фоторезистор работоспособен в течение указанного срока службы, т. е. изменение его параметров не превышает определенных норм, указанных в технических условиях и ГОСТ. Рабочие напряжения фоторезисторов отечественного производства приведены в табл. 9 и 10.

Спектральная характеристика характеризует чувствительность фоторезистора при действии на него излучения определенной длины волны. Спектральная характеристика фоторезистора определяется материалом, используемым для светочувствительного элемента. Сернисто-кадмиевые фоторезисторы имеют высокую чувствительность в видимой области спектра, селенисто-кадмиевые — в красной и ближайшей инфракрасной области спектра. У сернисто-свинцовых фото-

резисторов максимум чувствительности лежит в инфракрасной области спектра (рис. 18).

Инерционность и частотная характеристика фоторезистора. При освещении фоторезистора фототок достигает установившегося значения, как правило, через небольшой промежуток времени. При пре-

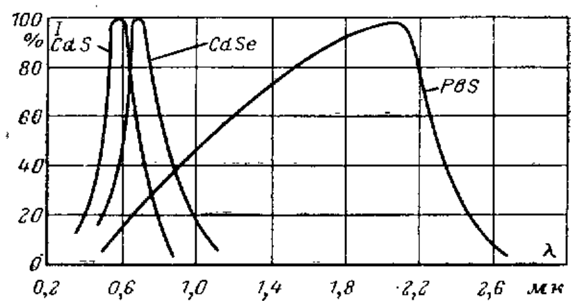


Рис. 18. Спектральные характеристики фоторезисторов, выполненных из CdS, CdSe и PbS.

кращении действия светового потока фототок уменьшается и через некоторое время достигает конечного значения. Изменение фототока при освещении фоторезистора прямоугольным световым импульсом показано на рис. 19.

Инерционность процесса нарастания или уменьшения фототока характеризуется постоянной времени τ, в течение которого фототок увеличивается или уменьшается в *e* раз, т. е. на 63%, считая, что изменение тока происходит по экспоненциальному закону. Наименьшую инерционность имеют сернисто-свинцовые фоторезисторы (40—400 *мксек*), а наибольшую — фоторезисторы, выполненные на основе сернистого кадмия. Средние величины постоянных времени у сернисто-кадмиевых фоторезисторов лежат в интервале от 1 до 140 *мсек.*

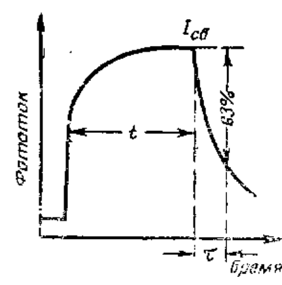


Рис. 19. Изменение фототока фоторезистора при воздействии одиночного светового импульса длительностью *t*.

Наличие инерционности у фоторезисторов приводит к тому, что величина их фототока зависит от частоты модуляции падающего на них светового потока. Естественно, что с увеличением частоты светового потока фототок уменьшается. Частотные характеристики фоторезисторов, показывающие уменьшение фототока с увеличением частоты модуляции светового потока, показаны на рис. 20. Инерционность в ряде случаев ограничивает применение фоторезисторов при работе с переменными световыми потоками.

Люкс-амперная характеристика фоторезистора показывает зависимость фототока от падающего светового потока. Полупроводниковые фоторезисторы имеют нелинейную люкс-амперную характеристику (рис. 21).

Таблица 11

Тип фоторезистора		Интервал рабочих температур, °С		Циклическое воздействие температур, (3 цикла), °С	Относительная влажность		Вибрация		Ударная нагрузка		Линейные перегрузки с ускорением *g*	Срок службы, тыс. *ч*	Срок хранения, *лет*
		от	до		%	при *t*, °С	Ускорение *g*	Диапазон частот, *гц*	Ускорение *g*	Количество ударов, тыс.			
Сернисто-кадмиевые	ФСК-1, 1а ФСК-2 ФСК-4 ФСК-6	—60	+35	—60 ÷ +85	80	25	7,5	5—1 000	35	10	25	10	8,5
	ФСК-5	—25	+55	—	80	20	—	—	—	—	—	5	3
	ФСК-Г1 ФСК-Г2 ФСК-Г7	—60	+85	—60 ÷ +85	98	40	7,5 7,5	5—1 000 5—80	35 12	10 10	25	10	8,5
	ФСК-П1 СФ2-2; СФ3-2 СФ2-1	—60	+85	—60 ÷ +35	98	20	12 2,5 2,5	10—3 000 10—80 10—80	35 12 12	4 5 10	50 9 9	5 1 3	5 5 —
Селенисто-кадмиевые	ФСД-1, 1а ФСД-Г1 СФ3-1	—60 —60 —60	+40 +40 +85	—60 ÷ +40 —60 ÷ +40 —60 ÷ +70	80 98 98	20 40 20	7,5 7,5 2,5	5—1 000 5—1 000 10—80	35 35 12	10 10 10	25 25 9	1 1 3	8,5 8,5 5
Сернисто-свинцовые	ФСА-1, 1а ФСА-6 ФСА-Г1 ФСА-Г2	—60	+70	—60 ÷ +70	80 98 98	25 40 40	7,5 7,5 7,5	5—10 000 5—1 000 5—80	35 35 12	10 10 10	25 25 25	10	8,5

При увеличении освещенности световой ток растет примерно пропорционально корню квадратному из освещенности. Наклон люкс-амперной характеристики определяется приложенным напряжением. При малых освещенностях (5—50 *лк*) у некоторых фоторезисторов (ФСК-1, ФСК-2) люкс-амперная характеристика линейна.

Полупроводниковые фоторезисторы предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока в различной электронной аппаратуре. Интервалы рабочих температур для различных типов

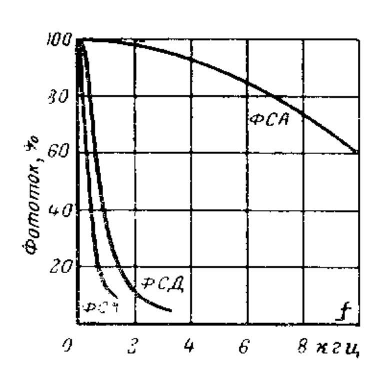


Рис. 20. Зависимость фототока от частоты модуляции светового потока.

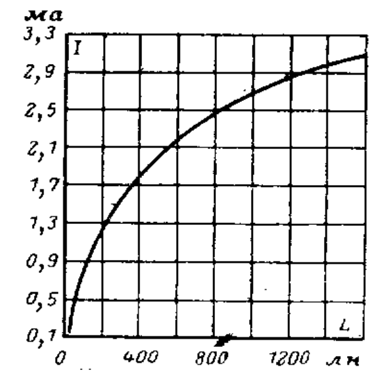


Рис. 21. Люкс-амперная характеристика фоторезистора типа ФСД (при $U=12$ *в*).

фоторезисторов указаны в табл. 11. Допустим резкий переход от предельной положительной температуры до предельной отрицательной в пределах трех циклов. Фоторезисторы могут работать при атмосферном давлении не ниже 0,05 *мм рт. ст.*

Фоторезисторы, имеющие герметичную конструкцию, работоспособны при относительной влажности 98% (при 40° С), а фоторезисторы без герметизации и влагозащиты светочувствительных элементов можно использовать при относительной влажности окружающего воздуха не более 80% при 25° С.

Допускается использование фоторезисторов в цепях импульсного и пульсирующего токов, причем в импульсном режиме работы мощность в импульсе не должна быть больше 10-кратной максимальной мощности рассеяния фоторезистора при средней мощности, не превышающей допустимого значения. Допускается эксплуатация фоторезисторов при повышенных напряжениях, не превышающих предельно допустимых значений, а также при больших интенсивностях света, однако мощность рассеяния не должна превосходить допустимого значения. Фоторезисторы работоспособны в сложных условиях (вибрации, ударные нагрузки и линейные ускорения).

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУКЦИИ ВАРИСТОРОВ

В качестве исходного материала для изготовления варисторов используют порошкообразный электротехнический карбид кремния. Карбид кремния представляет собой соединение двух элементов

IV группы периодической системы Менделеева — кремния и углерода. В природе карбид кремния встречается редко и в весьма ограниченных количествах. Технический карбид кремния получают в электрических печах при восстановлении двуокиси кремния (кварцевого песка):

$$SiO_2+3C=SiC+2CO.$$

В зависимости от условий проведения технологического процесса получают бесцветные, черные или зеленые кристаллы карбида кремния. Чистый карбид кремния стехиометрического состава бесцветен, поэтому по цвету можно судить о насыщенности материала примесями. В качестве сырья для получения технического карбида часто используют кварцит, антрацит и нефтяной кокс. При получении карбида кремния с зеленым оттенком в шихту добавляют поваренную соль; при получении черного электротехнического карбида кремния в нее добавляют бокситы. При получении электротехнического карбида кремния в качестве исходных компонентов используют кварцит, антрацит, нефтяной кокс, древесные опилки и бокситы, взятые в определенных процентных соотношениях. Исходные материалы проходят дробление, магнитную сепарацию для удаления частиц магнитных материалов, и их тщательно перемешивают для обеспечения однородности шихты. Приготовленную смесь помещают в электропечь, где при высокой температуре образуются сросшиеся пакеты кристаллов SiC, называемые друзами. Друзы карбида кремния измельчают и подвергают обогащению. Графит, осевший на кристаллах карбида кремния, вымывается водой с керосином; различные окислы удаляются кислотами. Исходный порошок промывается, сушится и подвергается магнитной сепарации.

Тип электропроводности и цвет окраски SiC определяются концентрацией примесей, а также избытком атомов углерода или кремния в составе. Электропроводность *n*-типа и зеленую окраску дают примеси элементов V группы периодической системы Менделеева (N, P, As, Sb, Bi); элементы II группы (Ca, Mg) и III группы (Al, B, Ga, In) дают голубую и фиолетовую окраски и обусловливают электропроводность *p*-типа.

При избытке атомов углерода материал имеет электропроводность *p*-типа, а при избытке атомов кремния — электропроводность *n*-типа. Собственная электропроводность у SiC с малой концентрацией примесей появляется при температуре 1 300—1 400° С.

Электропроводность карбида кремния в виде порошка определяется электропроводностью зерен материала и зависит от степени сжатия частиц, температуры и напряженности приложенного электрического поля.

При изготовлении варисторов для каждого заданного диапазона классификационных напряжений экспериментальным путем определяют необходимый гранулометрический состав исходных порошков. Достаточная механическая прочность образцов достигается за счет применения специальных связующих веществ (ультрафарфора, глины, жидкого стекла, кремнийорганических лаков и др.). Материалам с различными связующими компонентами даны различные названия. Карбид кремния с керамической связкой носит название тирит, карбид кремния с жидким стеклом — вилит, материал с ультрафарфоровой связкой, обожженный методом термоудара при высокой температуре, — лэтин.

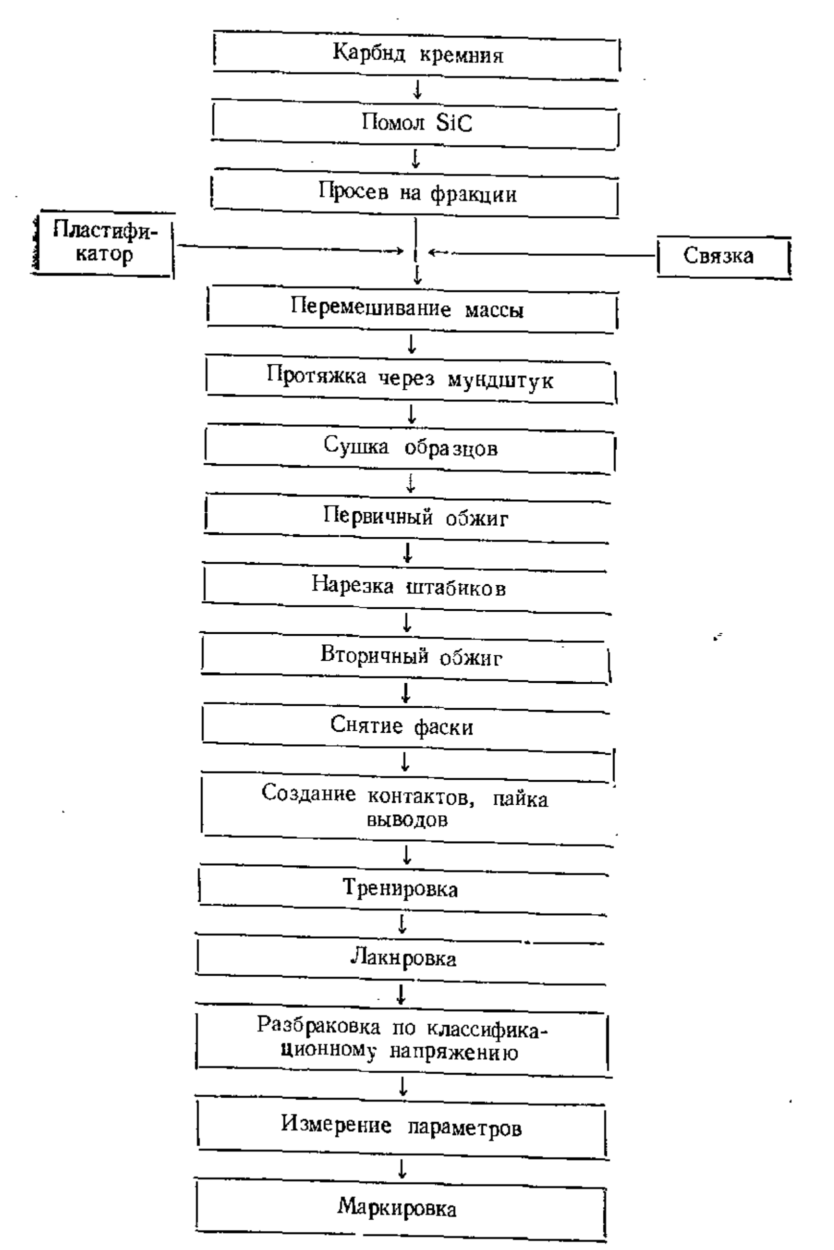


Рис. 22. Общая схема технологического процесса изготовления варисторов стержневого типа.

Советскими учеными разработаны новые типы варисторов на основе карбида кремния с классификационными напряжениями от 5,6 до 1 500 *в*.

Схема технологического процесса изготовления варисторов, разработанных в последние годы, приведена на рис. 22.

В качестве исходного материала для получения токопроводящих элементов варисторов используют электротехнический карбид кремния. После помола карбида кремния проводится магнитная сепарация или химическое обогащение порошка. При магнитной сепарации отходов материала больше, поэтому чаще используют химическое обогащение путем промывки порошка карбида кремния в смеси плавиковой и азотной кислот с водой. Химическое обогащение обеспечивает низкий процент магнитных материалов в порошке карбида кремния.

Рис. 23. Конструкции варисторов СН стержневого (*а*) и дискового (*б*) типов.

После просева порошок карбида кремния смешивают со связкой и пластификатором в специальных мешалках или на вальцах.

Прессовка заготовок и протяжка через мундштук производятся на специальных прессах. Далее образцы подвергают сушке в специально оборудованных для этой цели шкафах или на противнях.

При первичном обжиге, который проводят на воздухе, выгорают органические материалы, входящие в состав связки и пластификатора. После первичного обжига заготовки разрезают на части необходимых размеров. Вторичный обжиг заготовок проводится в водородных печах. Заготовки одну за другой проталкивают через рабочую зону печи, что обеспечивает одинаковые условия их температурной обработки и позволяет получать изделия с небольшим разбросом по параметрам. Далее на торцах токопроводящих элементов цилиндрической формы снимают фаску, для того чтобы установить колпачки на высокопроизводительных автоматах.

Контакты на токопроводящих элементах наносятся шоопированием или методом вжигания серебра. После установки выводов элементы подвергают электрической и тепловой тренировкам. Электрическая тренировка приводит к пробою слабых мест в структуре материала, способствуя стабилизации параметров элемента.

Для защиты от воздействия внешней среды токопроводящие элементы покрывают лаком. Далее варисторы разбраковывают по классификационному напряжению, определяют основные параметры и маркируют.

Конструктивное оформление варисторов различно. Полупроводниковые варисторы типа НПС выпускались в виде дисков с припаянными выводами, шайб различных диаметров или стержней с металлизированными концами. Нелинейные резисторы с большой

рассеиваемой мощностью выполнялись в виде дисков большого диаметра или столбиков из набора шайб с радиаторами охлаждения.

С 1964 г. промышленность выпускает новые варисторы типа СН (СН — сопротивление нелинейное). Первая цифра после букв обозначает материал — карбид кремния; вторая цифра — шифр конструкции: *1* — стержневой тип и *2* — дисковый тип; третья — размеры токопроводящего элемента варистора. Варисторы СН — объемные полупроводниковые резисторы с симметричной вольт-амперной характеристикой, выполненные из карбида кремния и керамического связующего материала.

Таблица 12

Тип варистора	Размеры, *мм*		Вес, *г*, не более
	L	*D*	
СН1-1-1	19	9	3,5
СН1-1-2	16	6,8	2,5

Таблица 13

Тип варистора	Классификационное напряжение, *в*	Размеры, *мм*		Вес, *г*, не более
		L	*D*	
СН1-2-1	56; 68; 82; 100; 120	6,5	16	4
	150; 180	7,5	16	
	220; 270	8,5	16	
СН1-2-2	15—100	6,5	12	3,5

По конструктивному оформлению полупроводниковые варисторы выпускаются двух видов: стержневые СН1-1-1 и СН1-1-2 и дисковые СН1-2-1 и СН1-2-2. Конструкции варисторов показаны на рис. 23.

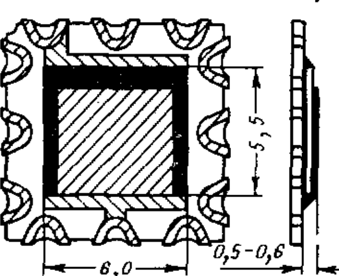


Рис. 24. Конструкция микромодульного варистора.

Стержневые варисторы имеют размеры и вес, указанные в табл. 12. Дисковые варисторы выполняются различных размеров в зависимости от классификационного напряжения.

В обозначениях варисторов указывают также классификационное напряжение (в вольтах) и допустимые отклонения (в процентах) от классификационного напряжения. Так, например, полное обозначение варистора стержневого типа с классификационным напряжением 820 *в* и допустимым отклонением ±10% имеет вид: СН1-1-1-820±10%. В обозначениях варисторов, выпускаемых в тропическом исполнении, добавляется буква Т: СН1-2-1-100±20% Т.

У полупроводниковых варисторов типа СН1-3, предназначенных для применения в микросхемах радиотехнических устройств, токопроводящий элемент, выполненный из карбида кремния, укреплен на стандартной керамической плате размером 9,6×9,6 *мм*. Конструкция микромодульного варистора СН1-3 показана на рис. 24.

ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВАРИСТОРОВ

Варисторы — нелинейные резисторы с симметричной вольт-амперной характеристикой (см. рис. 1), т. е. при постоянной величине приложенного напряжения перемена полярности не сказывается на величине тока.

Нелинейный резистор можно охарактеризовать величиной статического сопротивления при данном значении приложенного напряжения, а также величиной дифференциального сопротивления при том же напряжении:

$$R_с = \frac{U}{I}; \quad R_д = \frac{dU}{dI}.$$

Рассмотрим основные параметры варисторов.

Коэффициент нелинейности — отношение статического сопротивления в выбранной точке вольт-амперной характеристики к дифференциальному сопротивлению в этой же точке:

$$\beta = \frac{R_с}{R_д} = \frac{\Delta I U}{\Delta U I}.$$

Для обычного резистора это отношение равно единице, а для нелинейных вольт-амперных характеристик оно больше единицы.

В широком диапазоне напряжений и токов выражения для вольт-амперной характеристики варистора имеют следующий вид:

$$U = AI^{\alpha}; \; I = BU^{\beta}.$$

Коэффициент α называют показателем нелинейности. Коэффициент α и коэффициент нелинейности β связаны следующим образом:

$$\alpha = \frac{1}{\beta}.$$

Постоянные A и B связаны соотношением

$$B = A^{-\beta}.$$

Чтобы определить показатель или коэффициент нелинейности, достаточно найти токи, протекающие через варистор, I_1 и I_2 при значениях напряжения U_1 и U_2:

$$\alpha = \frac{\log \frac{U_2}{U_1}}{\log \frac{I_2}{I_1}}; \quad \beta = \frac{\log \frac{I_2}{I_1}}{\log \frac{U_2}{U_1}}.$$

В случае, когда вольт-амперная характеристика снята экспериментально, коэффициент нелинейности β, соответствующий точке M, можно определить графически как отношение абсциссы этой точки вольт-амперной характеристики $X_м$ к соответствующей подкасательной $T_м$ (см. рис. 2,*в*):

$$\beta = \frac{X_м}{T_м}.$$

Коэффициент нелинейности является одним из основных параметров варистора и его точное определение позволяет произвести расчеты схем. Следует заметить, что коэффициент и показатель нелинейности зависят от напряжения и изменяют свои значения от точки к точке. Постоянные A и B также имеют различные значения на разных участках вольт-амперной характеристики. Это вызывает затруднения при оценке качества варисторов и при их сравнении.

Важнейшим параметром варистора является *классификационное напряжение* — напряжение на варисторе при заданном значении тока.

Отклонение действительного напряжения варистора в процентах можно вычислить по формуле

$$\delta = \frac{U_д - U}{U} \cdot 100\%,$$

где $U_д$ — действительное измеряемое напряжение;

U — классификационное напряжение, указываемое при маркировке варистора.

Классификационное напряжение стержневых варисторов обычно определяют при токе 10 *ма*. У дисковых варисторов классификационное напряжение определяют при токах 3 *ма* (для варисторов типа СН1-2-2) и 2 *ма* (для варисторов типа СН1-2-1). Необходимо отметить, что классификационное напряжение не является рабочим эксплуатационным напряжением варистора. Рабочее напряжение выбирают, исходя из допустимой мощности рассеяния варистора и значения амплитуды напряжения.

Классификационный ток — ток, при котором определяют классификационное напряжение варистора. Величину асимметрии токов варистора можно рассчитать по формуле

$$\delta = \frac{I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\%,$$

где I_1 — ток при одной полярности напряжения;

I_2 — ток при противоположной полярности напряжения.

Естественно, что стремятся получить варисторы с минимальной асимметрией токов.

Вольт-амперная характеристика варистора изменяет свое положение при изменении температуры. С ростом температуры электропроводность рабочего элемента варистора несколько увеличивается. Для практических целей обычно определяют *температурный коэффициент тока:*

$$\text{ТК}I = \frac{I_2 - I_1}{I_1(t_2 - t_1)} \cdot 100\%,$$

где I_1 — ток при температуре t_1, равной $20 \pm 2°$ С;

I_2 — ток при температуре t_2, равной обычно $100 \pm 2°$ С.

Полупроводниковые варисторы типа СН имеют симметричную вольт-амперную характеристику с асимметрией токов не более 10% (рис. 25).

Допустимая мощность рассеяния — мощность, при которой варистор сохраняет свои параметры в заданных техническими условиями

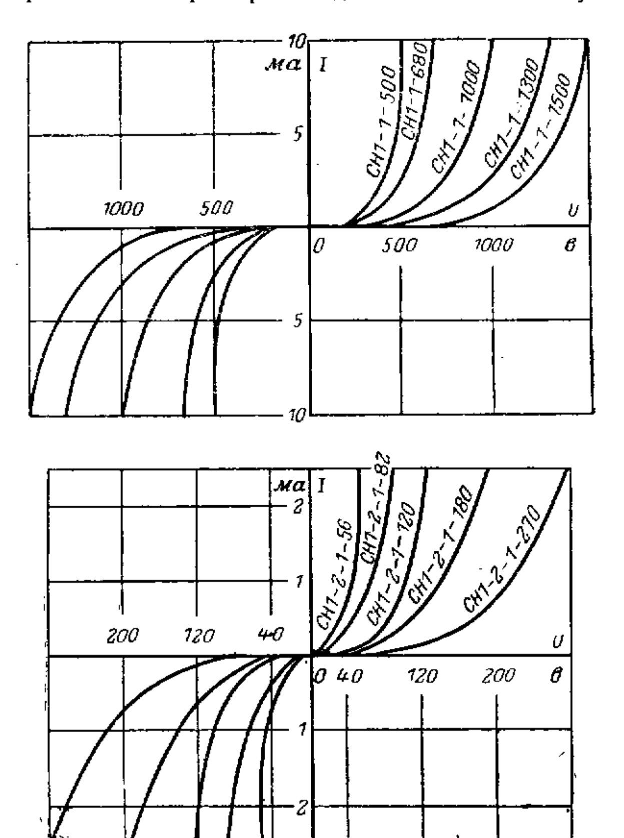


Рис. 25. Вольт-амперные характеристики варисторов.

пределах в течение срока службы. Основные параметры варисторов приведены в табл. 14 и 15.

Варисторы типов СН1-1 и СН1-2 предназначены для работы в интервале температур от −40 до +100° С в цепях постоянного, переменного и импульсного тока. Кратковременно варисторы могут работать при температуре +125° С, однако в случае их длительной эксплуатации при этой температуре начинают интенсивно развиваться процессы старения в связующем материале и электродах, что приводит к изменению параметров варисторов.

Таблица 14

Параметры варисторов	Тип варистора		
	НПС 5 (0,7-10)—(1,5-2,0)	НПС-20 (0,7-20)—(2-3)	НПС-50 (0,7-30)—(2,0-4,5)
Номинальное напряжение, *в*	5	20	50
Номинальный ток, *ма*	0,7—10	0,7—20	0,7—30
Коэффициент нелинейности	1,5—2,0	2,0—3,0	2,0—4,5
Допустимая мощность рассеяния, *вт*	0,5	0,75	1,0

Таблица 15

Тип варистора	Допустимая мощность рассеяния, *вт*	Классификационное напряжение, *в*	Допускаемое отклонение, %	Классификационный ток, *ма*	Коэффициент нелинейности, не менее	Интервал рабочих температур, °С
СН1-1-1	1,0	560 680 820 1 000 1 200 1 300 1 500	±10	10	3,5 4,0 4,0 4,0 4,0 4,5 4,5	—40÷+100
СН1-1-2	0,8	560 680 820 1 000 1 200 1 300 1 500	±10	10	3,5 4,0 4,0 4,0 4,0 4,5 4,5	—40÷+100
СН1-2-1	1,0	56—270	±10; ±20	2	3,5	—40÷+100
СН1-2-2	1,0	33—47 56—100	±10; ±20	3	3,0 3,5	—40÷+100
СН1-3	0,1	5,6—27	±10	5	2,0	—60÷+75

Варисторы в обычном исполнении работоспособны в условиях с относительной влажностью до 95% (при 30° С); варисторы в тропическом исполнении работоспособны в условиях с относительной влажностью до 98% (при температуре +40° С).

Механическая прочность варисторов весьма велика, они выдерживают вибрацию с ускорением до 2,5 *g* в диапазоне частот от 5 до 80 *гц*, а также ударные нагрузки с ускорением до 12 *g* и линейные нагрузки с ускорением до 9 *g*.

Как следует из табл. 15, варисторы имеют номинальные мощности рассеяния 0,8 и 1 *вт*. В импульсе мощность рассеяния может быть в несколько раз больше номинальной. Однако напряжение импульса не должно превышать значений, указываемых обычно в ТУ

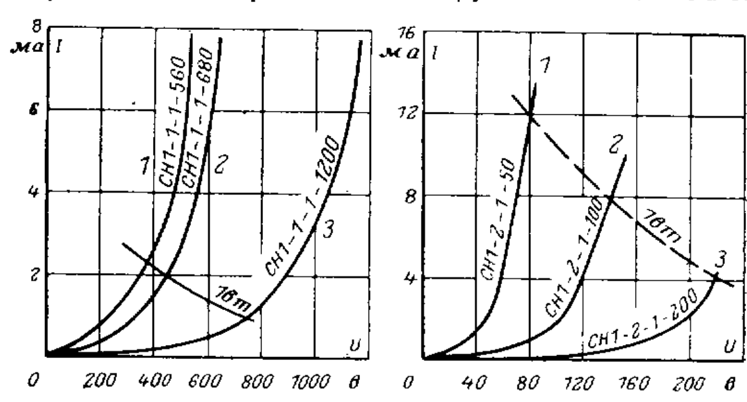


Рис. 26. Нагрузочные характеристики варисторов.

и ГОСТ; в противном случае возможен электрический пробой контактов между зернами карбида кремния. Нагрузочные характеристики ряда типов варисторов приведены на рис. 26. Электрические нагрузки варисторов при различных температурах окружающей среды показаны на рис. 27.

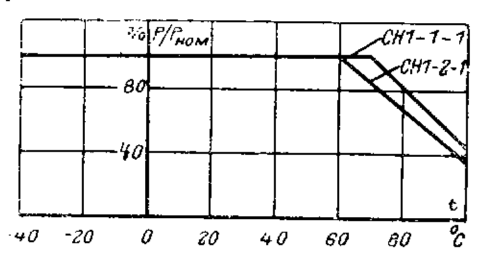


Рис. 27. Допустимые электрические нагрузки варисторов при различных температурах окружающей среды.

При нормальных условиях эксплуатации варисторы обладают высокой стабильностью параметров. Только у отдельных образцов варисторов в первые часы работы параметры могут измениться в пределах 2—3% (рис. 28).

Кривые *1—3* характеризуют стабильность рабочего напряжения стержневых варисторов с классификационными напряжениями 560 и 1 300 *в* при работе в блоках кадровой и строчной разверток телевизора «Темп-6»; кривые *2* и *4* характеризуют стабильность рабочего напряжения дисковых варисторов с классификационными напряжениями 100 и 220 *в* при воздействии импульсного напряжения.

Срок службы варисторов в нормальных климатических условиях составляет 3 000 *ч*. В течение этого срока изменение классификационного напряжения варисторов не должно превышать ±5%.

После трех термоциклов (с температурами от —40 до +100° С) изменения сопротивления варисторов не превышают ±2,5%. После

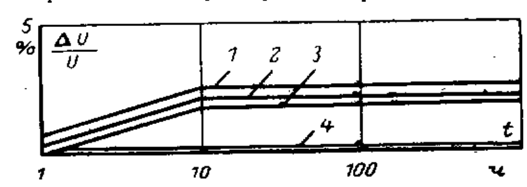


Рис. 28. Стабильность рабочего напряжения варисторов.

выдержки варисторов нормального исполнения в условиях относительной влажности 90—95% при температуре +30° С в течение 4 суток сопротивление изменяется не более, чем на 10%; варисторы в тропическом исполнении после выдержки в условиях относительной влажности 95—98% при температуре +40° С в течение 6 суток изменяют сопротивление не более, чем на 15%.

ОСНОВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВАРИСТОРОВ

Поскольку варисторы еще ограниченно используются в радиосхемах, кратко остановимся на применении этих приборов.

Нелинейная вольт-амперная характеристика этих приборов позволяет решать многие технические задачи: регулировать и стабилизировать работу отдельных блоков радиоаппаратуры, улучшать помехоустойчивость систем автоматической регулировки усиления и т. п.

С помощью варисторов можно эффективно защитить элементы и узлы радиоаппаратуры от перегрузок по напряжению, осуществить регулирование различных электрических величин, преобразование частоты, получить сложные функциональные схемы.

Основные применения полупроводниковых варисторов можно классифицировать по выполняемым функциям.

Одной из первых областей применения полупроводниковых варисторов является область защиты приборов и элементов схем от перенапряжений, а также связанная с этим защита контактов реле от разрушения.

Отметим, что последнее десятилетие характеризуется интенсивным развитием полупроводниковой электроники в связи с большим расширением производства различных полупроводниковых приборов. Однако перегрузочная способность по напряжению у многих полупроводниковых приборов невелика, и они требуют включения в схему элементов защиты. Также из года в год растет сеть радиосвязи с многочисленными коммутирующими устройствами, которые обычно являются источниками перенапряжений.

Полупроводниковые резисторы используются для защиты различных элементов и блоков от периодических и случайных коммутационных перенапряжений для предохранения от износа разрывных контактов и для искрогашения.

Предохранение разрывных электрических контактов от разрушения в момент размыкания цепей с индуктивными элементами осуществляют путем включения варистора параллельно контактам или источнику перенапряжения. Полупроводниковый варистор в этом случае играет роль нелинейного шунта, имеющего значительное сопротивление при отсутствии перенапряжения и наибольшее сопротивлние при всплесках перенапряжения. Место включения полупроводникового варистора определяется условиями работы схемы.

Как известно, при размыкании контактов реле или электромагнита развивается э. д. с. самоиндукции, напряжение которой часто становится достаточным для возникновения искры. Искрообразование приводит в конечном итоге к обгоранию и разрушению контактов, что нарушает нормальную работу реле или электромагнита электронной схемы.

Срок службы контактов в релейных схемах увеличивают путем подключения параллельно обмотке реле различных защитных элементов. Для этой цели обычно используют *RC*-цепочки, однако конденсаторы цепочек часто имеют большие габариты, что ограничивает, а в отдельных случаях исключает возможность использования *RC*-цепочек.

В цепях с небольшим значением коммутирующего тока в качестве защитных элементов иногда используют резисторы. Однако включение резистора параллельно обмотке реле или электромагнита вызывает дополнительный расход мощности в статическом положении контактов, а также увеличивает значение разрывного тока.

При использовании в качестве защитных элементов полупроводниковых варисторов можно почти полностью устранить недостатки, имеющие место при использовании резисторов и *RC*-цепочек. При включении полупроводникового варистора параллельно обмотке реле при возрастании напряжения на обмотке сопротивление варистора уменьшается и он ограничивает дальнейшее увеличение напряжения на контактах.

По сравнию с *RC*-цепочкой использование полупроводникового варистора обеспечивает следующие преимущества:

1) малые габариты и компактность защиты, поскольку варистор может быть установлен непосредственно на реле;

2) уменьшение количества элементов в цепи;

3) меньшую стоимость и простоту монтажа.

По сравнению с резистором применение варистора обеспечивает малое потребление мощности в статическом положении контактов, незначительное увеличение разрывного тока и значительно меньшее замедление времени отпускания реле (или электромагнита).

Полупроводниковые варисторы успешно используются для защиты межвитковой изоляции обмоток от перенапряжения в моменты переключений.

При конструировании различных радиотехнических устройств большой мощности и высоковольтных устройств переменного тока рассчитывают межвитковую изоляцию с большим коэффициентом запаса по электрической прочности, поскольку она должна обеспечивать надежную работу в коммутационных режимах. При включении варистора параллельно обмотке можно в значительной степени снизить амплитуду коммутационных перенапряжений, особенно при использовании полупроводниковых варисторов с большим коэффи-

циентом нелинейности. Ограничение коммутационных напряжений в радиосхеме обеспечивает повышение надежности работы в схеме полупроводниковых приборов (транзисторов, выпрямителей, тиристоров).

В настоящее время полупроводниковые варисторы широко используются в каскадах кадровой развертки телевизоров для ограничения напряжения на первичной обмотке трансформатора в момент обратного хода, когда за счет запасенной энергии возникает высоковольтный импульс напряжения. Амплитуда импульса составляет несколько киловольт и может вызвать пробой обмотки трансформатора. Для ограничения импульса обратного хода подключают варистор на клеммы первичной обмотки трансформатора. Сопротивление варистора для сравнительно низкого напряжения прямого хода является достаточно большим и не влияет на процессы формирования напряжения прямого хода. Во время обратного хода, когда возникает высоковольтный импульс, варистор шунтирует первичную обмотку трансформатора.

Особенно целесообразно использовать полупроводниковые варисторы в радиоаппаратуре, предназначенной для использования в угольной, химической промышленности, т. е. в тех случаях, когда опасность взрыва от искры очень велика.

Применение полупроводниковых варисторов в искробезопасных устройствах весьма перспективно, поскольку варистор неспособен запасать энергию в отличие от RC-цепочек, у которых емкость запасает энергию, способную вызвать разряд большой мощности при случайном замыкании выводов конденсатора.

Величина сопротивления полупроводникового варистора зависит от температуры, поэтому необходимо учитывать возможные изменения режима работы варистора при колебаниях температуры окружающей среды.

С использованием полупроводниковых варисторов можно осуществить различные схемы стабилизации напряжений и токов, а также стабилизировать режимы работы радиотехнических и электронных схем.

Нелинейная вольт-амперная характеристика варистора позволяет получить малые изменения напряжения на варисторе при значительном изменении протекающего по нему тока. Качество стабилизации напряжения определяется коэффициентом нелинейности варистора.

Если входной величиной стабилизатора считать ток варистора, а выходной — напряжение на варисторе, то коэффициент стабилизации определяется так же, как и коэффициент нелинейности варистора.

Таким образом, коэффициент нелинейности является параметром, характеризующим эффективность стабилизации с помощью данного варистора. Величина коэффициента нелинейности у большинства типов промышленных полупроводниковых варисторов составляет 4—4,5. Для создания стабилизаторов с большим коэффициентом стабилизации необходимо использовать усилители и управляемые элементы.

Полупроводниковые варисторы в схемах стабилизации напряжения могут быть использованы вместо стабилитронов тлеющего разряда и по сравнению с последними имеют в десятки раз меньший ток, не меняют своих характеристик от включения к включению и не имеют порогового напряжения, которое у стабилитронов тлеющего разряда на десятки процентов превышает рабочее напряжение стабилизации. Отметим, что в схемах стабилизации низкого напряжения применять стабилитроны тлеющего разряда нецелесообразно, так как они требуют сравнительно большого напряжения для их зажигания (65—70 *в*), в то время как для питания схем на транзисторах требуются напряжения 10—25 *в*. Варисторы перспективны также для высоковольтных стабилизаторов напряжения, поскольку они потребляют меньше мощности, чем стабилитроны.

Полупроводниковые варисторы используют в схемах преобразования частоты. С использованием варисторов разработаны схемы, осуществляющие модуляцию сигнала по фазе или амплитуде, выделение высших гармоник (умножение частоты), фазочувствительное детектирование (выделение низших гармоник).

При приложении к нелинейному полупроводниковому варистору синусоидального напряжения ток, протекающий через варистор, будет несинусоидальным и из него можно выделить основную и высшие гармоники.

Весьма перспективны полупроводниковые варисторы для электронных счетно-решающих схем — для воспроизведения различных функциональных зависимостей. Необходимая коррекция вольт-амперных характеристик варисторов для получения заданных функциональных зависимостей осуществляется путем включения последовательно или параллельно с варистором линейных резисторов.

Таким образом, полупроводниковые варисторы являются весьма перспективными полупроводниковыми приборами, с использованием которых может быть успешно решен широкий круг задач современной радиоэлектроники.

ОГЛАВЛЕНИЕ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Готовятся к печати следующие книги справочной серии

Голубев Ю. Л. и Жукова Т. В. Справочник по электровакуумным приборам. 15 л. 100 000 экз. 80 к.

Загоровский К. О., Михайлов И. В., Пропошин А. И. 200 схем на лампах и транзисторах. 5 л. 100 000 экз. 20 к.

Зайцев Ю. В. Полупроводниковые резисторы. 4 л. 75 000 экз. 16 к.

Леонтьев В. Ф. Зарубежные транзисторы широкого применения. 3 л. 75 000 экз. 12 к.

Ельяшкевич С. А. Телевизоры (справочные материалы). 28 л. 150 000 экз. 1 р. 22 к.

Курбатов Н. В. и Яновский Е. Б. Справочник по магнитофонам. 20 л. 150 000 экз. 90 к.

Онацевич М. А. Двигатели постоянного тока для магнитофонов, 3 л. 30 000 экз. 20 к.

Малинин Р. М. Резисторы. Изд. 2-е. 5 л. 25 000 экз. 20 к.

На складе издательства «Энергия» имеется книга А. Г. Соболевского «Тестеры и авометры», Госэнергоиздат, 1963, ц. 9 к.

Заказы направлять по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая набережная, 10, издательство «Энергия», отдел распространения.

Книга высылается наложенным платежом без задатка.

Зайцев Юлий Владимирович

Полупроводниковые резисторы

Редактор *А. П. Алешкин*
Технический редактор *О. Д. Кузнецова*
Корректор *В. С. Антипова*

Сдано в набор 20/IX 1968 г.
Подписано к печати 21/IV 1969 г. Т-04757
Формат 84×108$^{1}/_{32}$ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 2,52 Уч.-изд. л. 2,98
Тираж 60 000 экз. Цена 12 коп. Зак. 1491

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в Московской типографии № 19 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Наб. Мориса Тореза, 34. Зак. 446